



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

FACULTÉ DE GÉNIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Développement d'un béton modifié au latex adapté aux exigences de performance en milieu nordique – Étude de l'influence du latex sur la perméabilité aux ions chlorure et à l'eau, et la résistance aux cycles de gel-dégel et à l'écaillage

Mémoire de maîtrise

Spécialité : Génie civil

Jérémie PAQUIN

Jury : Richard GAGNÉ (directeur)

Jacques BERTRAND

Nadia POULIOT

Olivier BONNEAU

RÉSUMÉ

Les bétons modifiés au latex (BML) sont d'excellents bétons de réparation utilisés depuis les années 1970. Malgré tout, un nombre peu élevé de recherches se penche sur la durabilité en climat nordique sur ce type de béton. Actuellement, la durabilité des BML est étudiée à l'aide d'essais normalisés (résistance à la fissuration interne, ASTM C666, et résistance à l'écaillage, BNQ 2621-905) qui ne sont pas nécessairement bien adaptés pour refléter la durabilité réelle des BML.

Ce projet cherche à valider l'influence de nombreuses variables sur les essais permettant d'évaluer la durabilité des BML en climat nordique. Les variables sont les suivantes : le type de liant, le rapport eau/liant, le type de mûrissement avant les essais normalisés, les caractéristiques du réseau de bulles d'air et le type de malaxage. Le projet a aussi pour but de valider les valeurs de durabilité obtenues sur des bétons ayant subi 30 ans de service avec les BML.

Le projet de recherche réalisé démontre que les BML ont des valeurs critiques de facteur d'espacement supérieures à celles d'un béton conventionnel. Pour le liant GU, le facteur d'espacement critique (\bar{L}_{crit}) est 500 μm et, pour le liant ternaire, le facteur d'espacement critique est de 300 μm pour un facteur de durabilité de 60% et de 500 μm pour un facteur de durabilité de 80%. Ceci est valable pour les liants GU et ternaire étudiés dans ce projet. Malgré l'utilisation de grande quantité d'agent désentraîneur d'air dans les latex, il est possible d'entraîner suffisamment d'air du béton pour obtenir un réseau d'eau de bonne qualité ($\bar{L} < 230 \mu\text{m}$). L'étude de béton de laboratoire et de béton de bétonnière mobile démontre la durabilité aux climats nordiques des BML. De plus, l'échantillonnage d'un béton de 30 ans permet de confirmer la durabilité in situ.

Mots-clés : Béton modifié au latex, ciment GU, ciment ternaire, gel-dégel, écaillage, perméabilité aux ions chlorure, bétonnière mobile, facteur d'espacement, réseau d'air, latex styrène-butadiène, durabilité, adhérences, vides perméables, absorption

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Richard Gagné, ing., Ph.D., qui m'a offert ce projet. Sa capacité d'écoute et sa confiance m'ont permis de mener à terme ce projet. Nos discussions autour de son bureau ont été plus que formatrices pour moi.

Je tiens à remercier tout le personnel du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke pour l'aide qu'ils m'ont apportée. Je voudrais remercier plus particulièrement, Olivier Bonneau qui m'a aidé à coordonner les prélèvements en chantier et qui m'a aidé pour les gâchées en laboratoire, Rajko Vojnovic pour son implication dans les essais de gel-dégel et d'écaillage, Denis Bolduc pour la formation offerte pour les différents essais, Ghislaine Luc pour la formation aux essais de \bar{L} .

Je souhaite également remercier Béton Mobile de Québec pour l'opportunité d'effectuer un tel projet. Je tiens à remercier Jacques Bertrand, ing. qui m'a offert le projet ainsi que Salam Cissé, ing. et Gérard Dubé, ing. pour leur aide en chantier.

Je veux remercier tous les membres du Groupe de Recherche sur le Béton de l'UdeS ainsi que les stagiaires qui ont fait un court passage à Sherbrooke. De plus, je tiens à remercier le Conseil national de recherches Canada (CNRC), les Fonds de recherche Nature et technologies du Québec (FRQNT) ainsi que Mitacs pour leur soutien tout au long de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART	3
2.1. Qu'est-ce que le latex?	3
2.2. Principe de la modification au latex des bétons	5
2.2.1. Modèle en trois étapes.....	7
2.2.2. Phénomène de coalescence	9
2.2.3. Effet sur la zone d'interface pâte-granulat (ITZ)	9
2.2.4. Mûrissement	11
2.2.5. Efficacité des films de latex	12
2.3. Influence du latex sur les bétons frais	12
2.3.1. Affaissement.....	12
2.3.2. Entraînement d'air.....	13
2.3.3. Ouvrabilité.....	14
2.4. Influence du latex sur les propriétés durcies	14
2.4.1. Propriétés mécaniques.....	14
2.4.2. Perméabilités	17
2.4.3. Résistance au gel-dégel	20
2.4.4. Résistance à l'écaillage	20
2.5. Les bétonnières mobiles	21
CHAPITRE 3 : OBJECTIF DE LA RECHERCHE ET MÉTHODOLOGIE	25
3.1. Contexte global du projet et problématique	25
3.2. Objectif général et objectifs spécifiques.....	25
3.3. Méthodologie.....	26
3.3.1. Hypothèses et justifications.....	26
3.3.2. Procédures expérimentales.....	27
CHAPITRE 4 : MATÉRIAUX ET PROCÉDURES.....	36
4.1. Matériaux.....	36
4.1.1. Liants.....	36
4.1.2. Latex.....	36
4.1.3. Adjuvants	39
4.1.4. Granulat fin	40
4.1.5. Gros granulat	40

4.2. Procédures.....	41
4.2.1. Procédures de gâchage.....	41
4.2.2. Échantillonnage	43
4.2.3. Mûrissement	44
4.2.4. Formulations	45
CHAPITRE 5 : RÉSULTATS	59
5.1. Introduction.....	59
5.2. Propriétés mécaniques	59
5.3. Caractérisation du réseau des bulles d'air.....	65
5.4. Résistance à la fissuration interne.....	68
5.5. Résistance à l'écaillage	79
5.6. Perméabilité aux ions chlorure	83
5.7. Vides perméables	88
CHAPITRE 6 : ANALYSES ET DISCUSSIONS	91
6.1. La capacité d'entraînement d'air des BML	91
6.2. Résistance à la fissuration interne.....	93
6.2.1. Interprétations des résultats des cycles de gel-dégel	93
6.2.2. Influence du prolongement de la cure humide	100
6.3. Résistance à l'écaillage	102
6.4. Perméabilité aux ions chlorure	107
6.4.1. Influence du prolongement de la cure humide	107
6.4.2. Influence du volume d'air et du rapport E/L	109
CHAPITRE 7 : CONCLUSION	111
BIBLIOGRAPHIE	115
ANNEXE A – Tableau 3101-2 du chap.3, Tome VII de la norme 3101	
ANNEXE B – Échéancier du projet	
ANNEXE C – Procédure LS-413 du MTO	
ANNEXE D – Fiches techniques des granulats	
ANNEXE E – Résultats et photos des essais de résistance à la fissuration interne	
ANNEXE F – Résultats et photos des essais d'écaillage	

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Résistance à la traction du film de SBR suite à l'immersion dans une solution de chaux (ACI Committee 548, 2009)	4
Figure 2-2 : Liste de latex pour la modification des ciments (Lapointe, 1996)	5
Figure 2-3 : BML frais	7
Figure 2-4 : Évolution du latex dans la pâte de ciment (adapté de Ohama, 1987)	8
Figure 2-5 : Photographie au microscope électronique à balayage (MEB) des BC et BML (ACI, 2009)	8
Figure 2-6 : Coalescence du latex (Lapointe, 1996)	9
Figure 2-7 : Épaisseur de l'ITZ de plusieurs bétons (João Adriano Rossignolo, 2009)	11
Figure 2-8 : Relation entre la teneur en latex et l'affaissement (ACI Committee 548, 2009) ...	12
Figure 2-9 : Teneur en air de mortier en fonction de la concentration d'ADA (ACI Committee 548, 2009)	13
Figure 2-10 : Temps de prise des BML (ACI Committee 548, 2009)	14
Figure 2-11 : Résistance en traction en fonction du dosage en ciment (ACI Committee 548, 2009)	15
Figure 2-12 : Adhésion de BC et de MML (ACI Committee 548, 2009)	17
Figure 2-13 : Absorption d'eau de BML en fonction du dosage en ciment (João A. Rossignolo et Agnesini, 2004)	17
Figure 2-14 : Perméabilité aux ions chlorure en fonction de l'âge du béton (ACI Committee 548, 2009)	19
Figure 2-15 : Bétonnière mobile	21
Figure 2-16 : Vis sans fin	22
Figure 2-17 : Surface volumique en fonction de la teneur en air frais (Larose et Pigeon, 1988)	23
Figure 2-18 : Relation entre la teneur en air frais et le facteur d'espacement pour des bétons produit en bétonnière mobile (Larose et Pigeon, 1988)	23
Figure 2-19 : Relation entre la teneur en air frais et le facteur d'espacement pour des bétons produit en usine (Larose et Pigeon, 1988)	24
Figure 3-1 : Organisation des phases	28
Figure 4-1 : Réservoir GRV de latex	36
Figure 4-2 : Contenant de 20L utilisé pour la préparation des gâchées	37
Figure 4-3 : Extrémité de l'agitateur	37
Figure 4-4 : Échantillon de latex après le séchage (LS-413)	38
Figure 4-5 : FTIR du latex en laboratoire	39
Figure 4-6 : Mélangeur du laboratoire	42
Figure 4-7 : Cuve de la bétonnière mobile	43
Figure 4-8 : Identification de la nomenclature	45
Figure 4-9 : Dalle du pont de l'île verte	47
Figure 4-10 : Section de dalle	48
Figure 4-11 : Échantillons prélevés du tablier du pont de l'Île Verte	48
Figure 5-1 : Résistance à la compression des bétons de la phase 2	60
Figure 5-2 : Résistance à la compression des bétons GU de la phase préliminaire 3.2	61
Figure 5-3 : Résistance à la compression de bétons ternaires de la phase préliminaire 3.2	62
Figure 5-4 : Résistance en compression des bétons avec liant GU de la phase 3.3	63

Figure 5-5 : Résistance en compression des bétons avec liant ternaire de la phase 3.3	64
Figure 5-6 : Résistance au fendage des bétons de la phase 3.3	65
Figure 5-7 : Volume d'air frais des bétons de toutes les phases en fonction des dosages d'ADA/AEA	67
Figure 5-8 : Facteur d'espacement des bétons de toutes les phases en fonction des dosages d'ADA/AEA	67
Figure 5-9 : Surface spécifique des bétons de toutes les phases en fonction des dosages d'ADA/AEA	68
Figure 5-10 : Courbes du facteur de durabilité des bétons de la phase 1	69
Figure 5-11 : Courbes de variation de la masse des bétons de la phase 1	69
Figure 5-12 : Courbes des déformations des bétons de la phase 1	70
Figure 5-13 : Courbes du facteur de durabilité des bétons de la phase 2	71
Figure 5-14 : Courbes de variation de la masse des bétons de la phase 2	71
Figure 5-15 : Courbes des déformations des bétons de la phase 2	71
Figure 5-16 : Courbes du facteur de durabilité des bétons (0.30-GU) de la phase 3 - laboratoire	72
Figure 5-17 : Courbes de variation de la masse des bétons (0.30-GU) de la phase 3 - laboratoire	72
Figure 5-18 : Courbes des déformations des bétons (0.30-GU) de la phase 3 – laboratoire.....	73
Figure 5-19 : Courbes du facteur de durabilité des bétons (0.35-GU) de la phase 3 - laboratoire	73
Figure 5-20 : Courbes de variation de la masse des bétons (0.35-GU) de la phase 3 - laboratoire	74
Figure 5-21 : Courbes des déformations des bétons (0.35-GU) de la phase 3 - laboratoire.....	74
Figure 5-22 : Courbes du facteur de durabilité des bétons (0.32-Ternaire) de la phase 3 - laboratoire	75
Figure 5-23 : Courbes de variation de la masse des bétons (0.32-Ternaire) de la phase 3 - laboratoire	75
Figure 5-24 : Courbes des déformations des bétons (0.32-Ternaire) de la phase 3 - laboratoire	76
Figure 5-25 : Courbes du facteur de durabilité des bétons (GU) de la phase 3 – chantier.....	76
Figure 5-26 : Courbes de variation de la masse des bétons (GU) de la phase 3 - chantier	77
Figure 5-27 : Courbes des déformations des bétons (GU) de la phase 3 – chantier.....	77
Figure 5-28 : Courbes du facteur de durabilité des bétons (ternaire) de la phase 3 – chantier .	78
Figure 5-29 : Courbes de variation de la masse des bétons (ternaire) de la phase 3 - chantier .	78
Figure 5-30 : Courbes des déformations des bétons (ternaire) de la phase 3 – chantier	78
Figure 5-31 : Résultats des essais de KCL de la phase 3.2	84
Figure 5-32 : Résultats des essais de KCL de la phase préliminaire 3.2	85
Figure 5-33 : Variation de la cure humide pour la formulation avec liant GU	86
Figure 5-34 : Résultats des essais de KCL de la phase 3 - liant GU	87
Figure 5-35 : Résultats des essais de KCL de la phase 3 - liant ternaire.....	87
Figure 5-36 : Résultats d'absorption et de vides perméables de la phase 2	89
Figure 5-37 : Absorption des bétons de la phase préliminaire 3.2	89
Figure 5-38 : Vides perméables de la phase préliminaire 3.2	90
Figure 5-39 : Résultats d'absorption et de vides perméables de la phase 3	90
Figure 6-1 : Relation entre le facteur d'espacement et le volume d'air frais	92
Figure 6-2 : Relation entre la surface spécifique et le volume d'air frais	93

Figure 6-3 : Facteur de durabilité en fonction du facteur d'espacement - Liant GU	95
Figure 6-4 : Déformation en fonction du facteur d'espacement - Liant GU	95
Figure 6-5 : Facteur de durabilité en fonction de la surface spécifique - Liant GU.....	96
Figure 6-6 : Déformation en fonction de la surface spécifique - Liant GU	96
Figure 6-7 : Facteur de durabilité en fonction du facteur d'espacement - Liant ternaire	98
Figure 6-8 : Déformation en fonction du facteur d'espacement - Liant ternaire	98
Figure 6-9 : Facteur de durabilité en fonction de la surface spécifique - Liant ternaire	99
Figure 6-10 : Déformation en fonction de la surface spécifique - Liant ternaire.....	99
Figure 6-11 : Masse de débris en fonction du facteur d'espacement de la phase 3 - Liant GU	103
Figure 6-12 : Masse de débris en fonction de la surface spécifique de la phase 3 - Liant GU104	
Figure 6-13 : Masse de débris en fonction du facteur d'espacement de la phase 3 - Liant ternaire.....	106
Figure 6-14 : Masse de débris en fonction de la surface spécifique de la phase 3 - Liant ternaire.....	106
Figure 6-15 : Perméabilité aux ions chlorures - Étude vs ACI	108
Figure 6-16 : Influence du volume d'air frais sur la perméabilité des ions chlorure - Liant GU	110
Figure 6-17 : Influence du volume d'air frais sur la perméabilité des ions chlorure - Liant ternaire.....	110

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Formulation typique du latex styrène-butadiène (ACI Committee 548, 2009)	6
Tableau 2-2 : Propriétés mécaniques des BML(Mindess, 2002)	15
Tableau 2-3 : Influence de l'immersion sur les résistances de mortier modifié au latex (Mindess, 2002).....	16
Tableau 2-4 : Coefficient de diffusion des ions chlorure de différents échantillons (Zeng, 1996)	18
Tableau 2-5 : Coefficient de diffusion pour plusieurs latex (adapté de Mindess, 2002).....	19
Tableau 3-1 : Hypothèses de formulation des bétons en laboratoire.....	27
Tableau 3-2 : Séquences d'essais	28
Tableau 3-3 : Formulation et essais de la phase 1	29
Tableau 3-4 : Formulation et essais de la phase 2	30
Tableau 3-5 : Formulation et essais de la phase 3	31
Tableau 3-6 : Formulation et essais de la phase 3.1	32
Tableau 3-7 : Formulation et essais de la phase préliminaire 3.2.....	33
Tableau 3-8 : Formulation et essais de la phase 3.2	34
Tableau 3-9 : Formulation et essais de la phase 3.3	35
Tableau 4-1 : Comparaison entre MTO LS-413 et ASTM C494.....	38
Tableau 4-2 : Granulométrie, module de finesse, densité et absorption du granulat fin	40
Tableau 4-3 : Granulométrie, densité et absorption du gros granulat	41
Tableau 4-4 : Séquence de malaxage	42
Tableau 4-5 : Comparaison des mûrissements selon les échantillons	45
Tableau 4-6 : Description des termes de la nomenclature.....	46
Tableau 4-7 : Particularité des formulations	46
Tableau 4-8 : Formulation des bétons de la phase 1	48
Tableau 4-9 : Caractérisation de BML de diverses structures.....	49
Tableau 4-10 : Formulation des bétons de la phase 2	50
Tableau 4-11 : Formulation des bétons de la phase 3.1	52
Tableau 4-12 : Formulation des bétons de la phase préliminaire 3.2	53
Tableau 4-13 : Formulation des bétons de la phase 3.3 - Liant GU laboratoire.....	55
Tableau 4-14 : Formulation des bétons de la phase 3.3 - Liant ternaire laboratoire	56
Tableau 4-15 : Formulation des bétons de la phase 3.3 -Bétonnière mobile	57
Tableau 5-1 : Résultats des propriétés mécaniques de la phase 1	59
Tableau 5-2 : Résultats des essais d'écaillage des bétons de la phase 1	79
Tableau 5-3 : Résultats des essais d'écaillage des bétons de la phase 2	80
Tableau 5-4 : Résultats des essais d'écaillage des bétons de laboratoire – liant GU de la phase 3	81
Tableau 5-5 : Résultats des essais d'écaillage des bétons de laboratoire – liant ternaire de la phase 3	82
Tableau 5-6 : Résultats des essais d'écaillage des bétons de chantier de la phase 3.....	82
Tableau 5-7 : Données à 280 jours des bétons	88
Tableau 6-1 : Valeurs de durabilité des formulations avec cure latex et cure hybride.....	101
Tableau 6-2 : Échelle des perméabilités aux ions chlorures.....	108
Tableau 6-3 : Pourcentage de gain à l'essai ASTM C1202 dû au prolongement de la cure humide - Liant GU	109
Tableau 7-1 : Type de conditionnement à privilégier selon le type d'essai	114

ACRONYMES

ADA = Agent désentraîneur d'air

AEA = Agent entraîneur d'air

BBM = Béton produit en bétonnière mobile

BC = Béton conventionnel

BL = Béton produit avec l'équipement de laboratoire

BM = Bétonnière mobile

BML = Béton modifié au latex

CV = Cendre volante

E/L = Eau/Liant

FS = Fumée de silice

ITZ = Zone d'interface pâte-granulat

MML = Mortier modifié au latex

P/C = Polymère/Ciment

SBR = Latex styrène-butadiène

Seq.Base = Protocole expérimental de base

Seq.Dura = Protocole expérimental des essais caractérisant la durabilité

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Le climat nordique rigoureux québécois cause de nombreuses dégradations aux structures et ouvrages de génie civil. Ces structures principalement faites de bétons se dégradent selon les mécanismes de fissuration interne, d'écaillage et d'attaque par les ions chlorure. Cela force le génie québécois à réparer plus hâtivement son parc immobilier. Plusieurs matériaux ont fait leur chemin sur le marché dans le but de prolonger la durée de vie des réparations tels que les bétons modifiés au latex (BML). Utilisés depuis les années 1980, les BML offrent un comportement différent des bétons conventionnels (BC), ils possèdent une meilleure résistance en traction, une adhésion accrue, une meilleure ouvrabilité et des perméabilités plus faibles aux agents agressifs. Il est important de mentionner que les BML sont reconnus pour leur bonne durabilité en climat hivernal. Les techniques de confection et de mûrissement des BC sont bien établies, par contre les BML nécessitent des pratiques légèrement différentes des pratiques conventionnelles. Malgré une bonne compréhension des BML de la part de la communauté académique, peu d'équipes ont publié des résultats concernant la durabilité des bétons modifiés au latex en climat nordique ainsi que leur performance en chantier. Cela complique davantage la réalisation des travaux, car des analyses plus approfondies sont exigées lorsqu'un matériau obtient une performance inadéquate aux essais.

Les BML sont surtout utilisés comme béton de réparation. Ce type de béton est généralement produit en petit volume à l'aide d'une bétonnière mobile. Le malaxage effectué par ce type de bétonnière requiert un calibrage et un contrôle rigoureux puisque le contrôle du rapport E/L et de la teneur en air sont fait en chantier. Généralement, les premières 24h de la cure des BML se font en milieu humide, le reste de la cure se poursuit par une période de séchage à humidité ambiante. Le séchage permet au latex de polymériser dans la matrice. Cette pratique pourrait être pénalisante puisque le béton dispose de très peu de temps et d'apport en eau pour s'hydrater. L'humidité relative de la période de séchage n'est actuellement pas normée. Ces sources de variabilité font en sorte qu'il existe une variabilité quant à la performance des BML soumis aux essais accélérés évaluant la durabilité en climat nordique rigoureux. Un conditionnement (formulation et mûrissement) optimisé au BML permettrait de réduire les variabilités face aux multiples essais.

Le but du projet est d'étudier la durabilité des BML au climat nordique. Spécifiquement la résistance à la fissuration interne et à l'écaillage ainsi que la résistance à la pénétration des ions chlorures. Des BML produits en laboratoire et en chantier seront à l'étude. De plus, une analyse des performances d'un BML ayant subi les conditions de service sera conduite. Les variables portées à l'étude sont les suivantes :

- Le type de liant
- Le rapport eau/liant (E/L)
- Le type et la durée du mûrissement avant les essais normalisés en laboratoire
- Les caractéristiques du réseau de bulles d'air
- Le type de malaxage; comparaison entre les malaxeurs de laboratoire et les bétonnières mobiles

Ce programme expérimental permettra d'améliorer la compréhension sur les BML et sur les principaux facteurs affectant sa durabilité. Les nombreux essais, provenant de la production en laboratoire et en chantier ainsi que la caractérisation en service, appuieront les conclusions de ce projet.

Ce projet a été initié par l'entreprise Béton Mobile du Québec, inc. (BMQ) basée à Laval. Celle-ci est spécialisée dans la production de béton de spécialité en bétonnière mobile. BMQ vise à rassurer les donneurs d'ouvrage sur la qualité des BML et sur leur durabilité. Le projet s'intègre à un stage Mitacs Accélération.

CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART

2.1. Qu'est-ce que le latex?

Le latex est une dispersion de particules de polymère dans un tensioactif à base d'eau. La norme ASTM C 1059-13 classe les latex selon deux types : Type I Latex réémulsifiable et type II Latex non réémulsifiable. Le type I n'est pas recommandé dans les applications où il y aura immersion dans l'eau. Le type II peut être utilisé dans des conditions d'immersion ou de haute humidité (Ramakrishnan, 1992). De plus, ces polymères se classent selon les caractéristiques suivantes : cationique, anodique et non ionique. Les latex s'adaptant le mieux dans les mélanges de ciment Portland sont les polymères non ioniques dus à leur plus grande stabilité (ACI Committee 548, 2009).

Les principaux polymères de type latex utilisés dans le béton sont le latex styrène-butadiène (SBR), le latex acrylique et le latex vinyle acétate. Les BML fait avec le latex vinyle acétate ont des perméabilités plus élevées que le béton traditionnel tandis que les BML avec le latex styrène-butadiène ont des perméabilités inférieures. Les principaux champs d'application pour le latex styrène-butadiène et le latex acrylique sont les suivants.

- SB : Chape de tablier de pont, dalle de stationnement multiétage, réparation de dalle et réparation de joints de dilatation.
- Acrylique : adhésifs pour tuile, coulis de ciment, recouvrement de sol, enduit de recouvrement.

La proportion de styrène/butadiène est importante puisqu'une configuration différente de 70:30 (% styrène : % butadiène) peut induire des propriétés qui diminueront la résistance à la compression. De plus, la cohésion et l'adhérence du béton produit pourraient aussi être diminuées (Ramakrishnan, 1992). Le latex styrène-butadiène offre aussi des avantages en fonction du film qu'il produit. Deux films de différent latex (vinyle acétate et styrène-butadiène) ont été testés dans une solution de chaux. Le film de vinyle acétate gonfle dans la même solution ce qui lui fait perdre sa cohésion et sa résistance ce qui donne un avantage au SBR. Le film créé par le latex styrène-butadiène est moins résistant au changement dû à l'immersion dans la solution de chaux comparativement au film de vinyle acétate. Cependant, son immersion dans la solution de chaux ne l'affaiblit pas, au contraire la résistance à la traction augmente suite à l'immersion (Ramakrishnan, 1992). La figure 2-1 présente la résistance à la traction des films

de latex lors d'exposition à une solution de chaux. Les différentes situations présentées démontrent que le latex styrène-butadiène semble plus adapté à l'utilisation dans un béton modifié au latex.

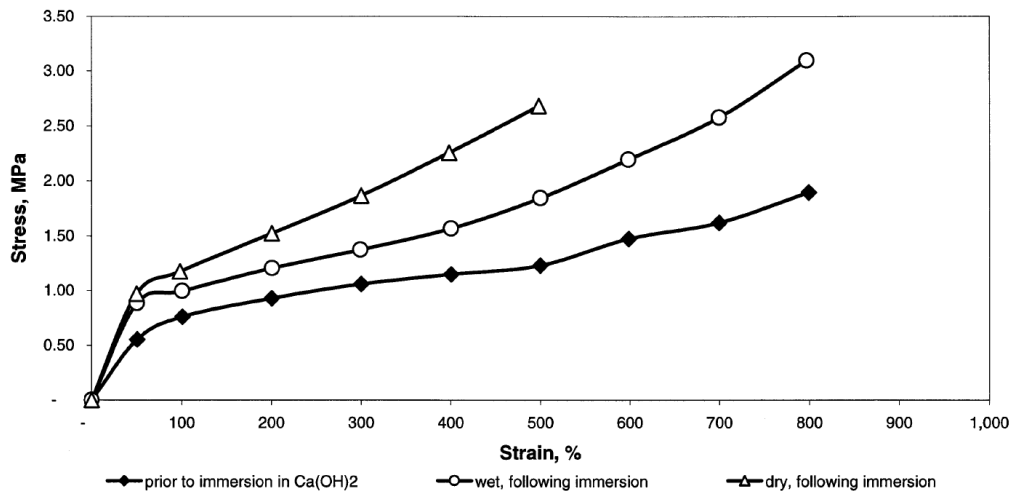


Figure 2-1 : Résistance à la traction du film de SBR suite à l'immersion dans une solution de chaux (ACI Committee 548, 2009)

Il existe une vaste gamme de latex pouvant être utilisé dans le domaine des bétons. Chacun d'eux réagit différemment dans la matrice cimentaire et offre des bonifications différentes. La figure 2-2 présente les différentes familles de latex pouvant être utilisées dans le domaine. Certains d'entre eux ont fait l'objet de plusieurs études tandis que d'autres font partie d'une utilisation plus nichée. En général, la modification aux polymères permet d'améliorer l'adhésion, de réduire les perméabilités, augmenter les temps de prise, augmenter les performances en traction et en flexion. Par contre, certains latex ne sont pas en mesure d'avoir des ratios coût/performance suffisamment intéressants pour que leur utilisation soit justifiable. De plus, la littérature montre que leur durabilité est parfois limitée. Par exemple, le chlorure de vinyle vinylidène n'est plus utilisé dans les bétons, puisqu'il libérerait des chlorures dans la matrice cimentaire. Il reste néanmoins que les polymères les plus couramment utilisés sont les latex styrène-butadiène, les latex acryliques et les époxy. Les latex styrène-butadiène sont utilisés dans les bétons et dans les mortiers. Leur forte adhésivité, leur faible perméabilité ainsi que leur bonne résistance au gel-dégel sont les raisons de leur utilisation. On les retrouve dans la réparation d'ouvrage d'art et ils peuvent être produits à grand volume. Les latex acryliques sont utilisés dans la modification des mélanges de ciment hydraulique. Ils améliorent l'adhésion,

la résistance à l'abrasion, à l'impact et en flexion ainsi que les perméabilités. Leur utilisation se fait majoritairement sur la réparation de faible épaisseur. Les résines époxy sont utilisées lorsqu'une adhésion et une faible perméabilité sont requises, par exemple dans les coulis, les surfaces antidérapantes, les enduits de protection et dans les réparations de béton (ACI Committee 548, 2009). Les latex bitumineux ont une utilisation pour les bétons bitumineux pour les routes.

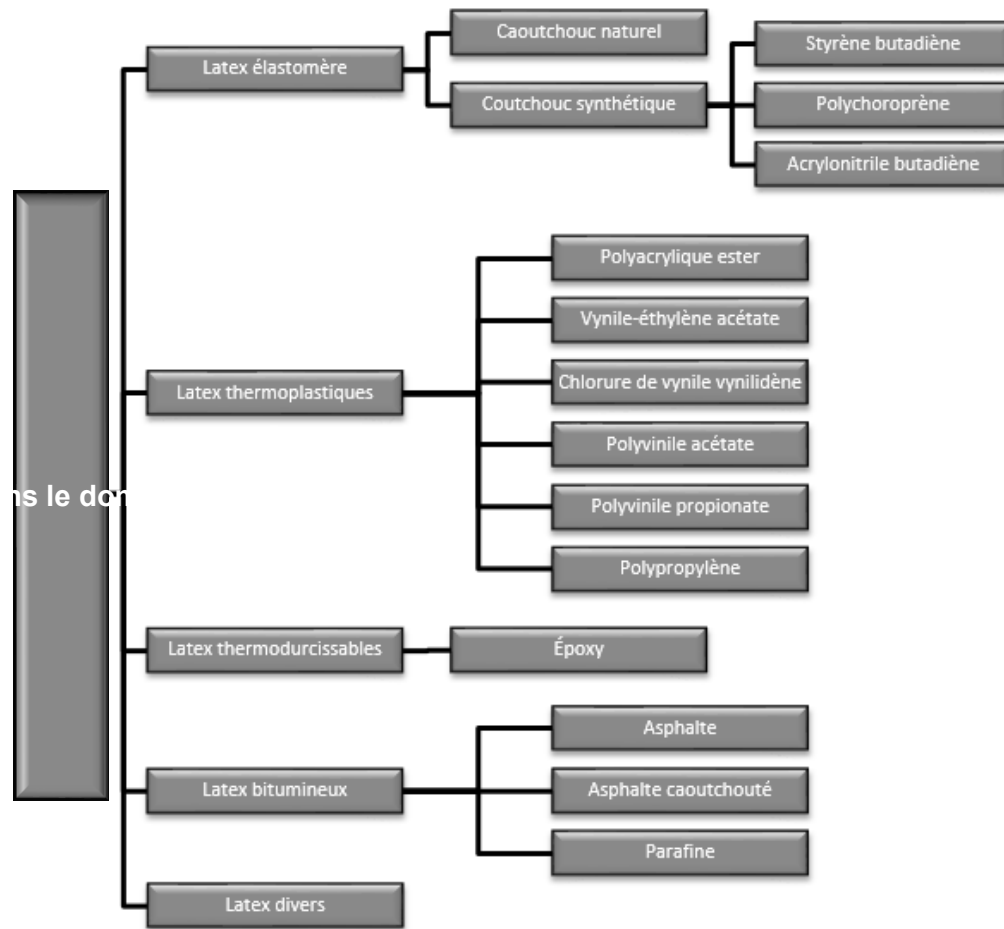


Figure 2-2 : Liste de latex pour la modification des ciments (Lapointe, 1996)

2.2. Principe de la modification au latex des bétons

L'ajout de latex améliore principalement trois aspects des performances du béton. D'abord, il permet de réduire les perméabilités et les mécanismes de transport dans la pâte de ciment. Ensuite, il améliore l'adhésion de la pâte de ciment avec les substrats minéraux. Finalement, il augmente la déformabilité du béton, plus particulièrement la résistance à la déformation en traction. Le latex est ajouté durant le gâchage du béton sous la forme d'un liquide laiteux et

blanchâtre. Ce liquide comporte un tensioactif à base d'eau permettant de conserver les particules de polymère en suspension séparées les unes des autres. Les proportions à l'intérieur du liquide sont généralement 50% d'eau et 50% de particules de latex solides en suspension. Le tableau 2-1 (adapté de ACI committee 548, 2009) présente la formulation typique du latex styrène-butadiène. Il est important de noter que l'eau contenue dans le mélange cité précédemment doit être incluse lors du calcul de l'eau de gâchage nécessaire. Le dosage en latex dans le béton est exprimé en L/m³ et celui-ci est choisi en fonction d'obtenir un dosage en extrait sec de polymère par rapport à la masse de ciment. En général, le dosage en extrait sec représente entre 5% et 20% de masse solide de latex par poids de ciment. L'ajout du latex change l'apparence du béton, lui donnant une teinte bleu vert ainsi qu'une forte odeur caractéristique, voir figure 2-3. (ACI Committee 548, 2009; Ohama, 1987)

Tableau 2-1 : Formulation typique du latex styrène-butadiène (ACI Committee 548, 2009)

Styrene	64
Butadiene	35
A vinyl carboxylic acid	1
Nonionic surfactant	7
Anionic surfactant	0.1
Ammonium persulfate	0.2
Water	105



Figure 2-3 : BML frais

2.2.1. Modèle en trois étapes

Deux processus distincts gouvernent la modification au latex des bétons : l'hydratation des grains de ciment et la formation d'un film de polymère autour des grains de ciment hydratés. Il est possible de présenter l'interaction du latex et de la pâte de ciment dans un modèle en trois étapes. Le modèle est schématisé à la figure 2-4 (ACI Committee 548, 2009).

Étape 1 : L'hydratation du ciment entraîne la formation de gel de C-S-H. Des particules de latex commencent à se déposer sur le mélange de gel de C-S-H et de grains de ciment non hydraté. Débutant ainsi la formation de la comatrice de ciment portland et de latex (ACI Committee 548, 2009; Ohama, 1987).

Étape 2 : Le processus d'hydratation du ciment, consommant de plus en plus l'eau, confine les particules de latex dans les pores capillaire. Les pores capillaires se vidant pour nourrir la réaction d'hydratation entraînent la floculation du latex à l'intérieur des pores capillaires. Cela crée une couche serrée enveloppant les réactions d'hydratation et les grains de ciment non hydraté. Donc, la formation des hydrates de ciment permet aux particules de latex floculées d'être en contact avec la pâte de ciment et les substrats minéraux (ACI Committee 548, 2009; Ohama, 1987).

Étape 3 : Le drainage de l'eau entre les particules de latex permet au phénomène de coalescence de se produire pour ainsi former un film continu de latex. (Figure 2-5) Ce phénomène permet la formation d'un réseau monolithique ce qui lui confère les caractéristiques de perméabilité du béton (grâce au film de latex) et de résistance mécanique (ACI Committee 548, 2009; Ohama, 1987).

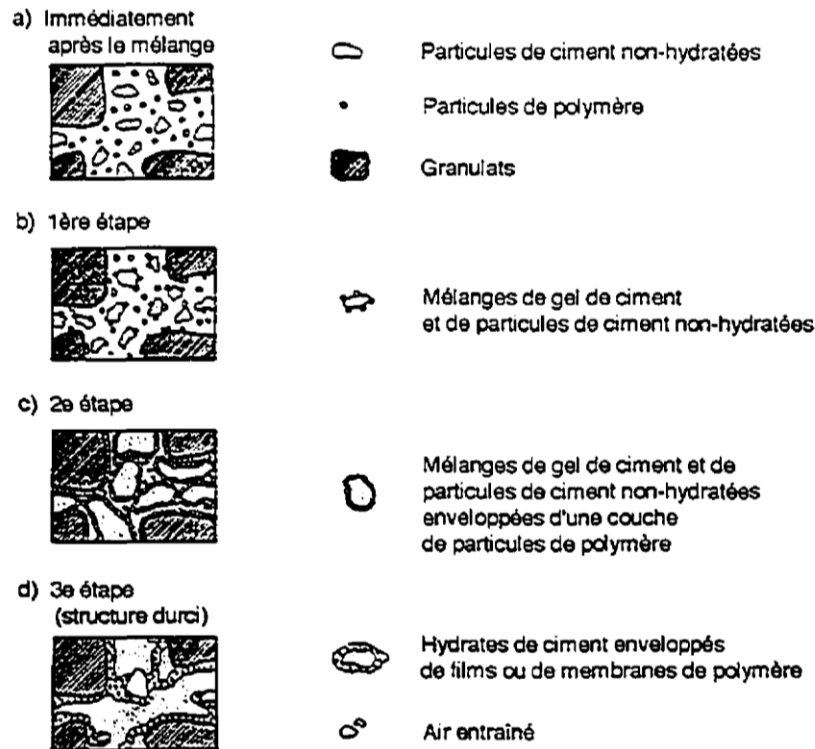


Figure 2-4 : Évolution du latex dans la pâte de ciment (adapté de Ohama, 1987)

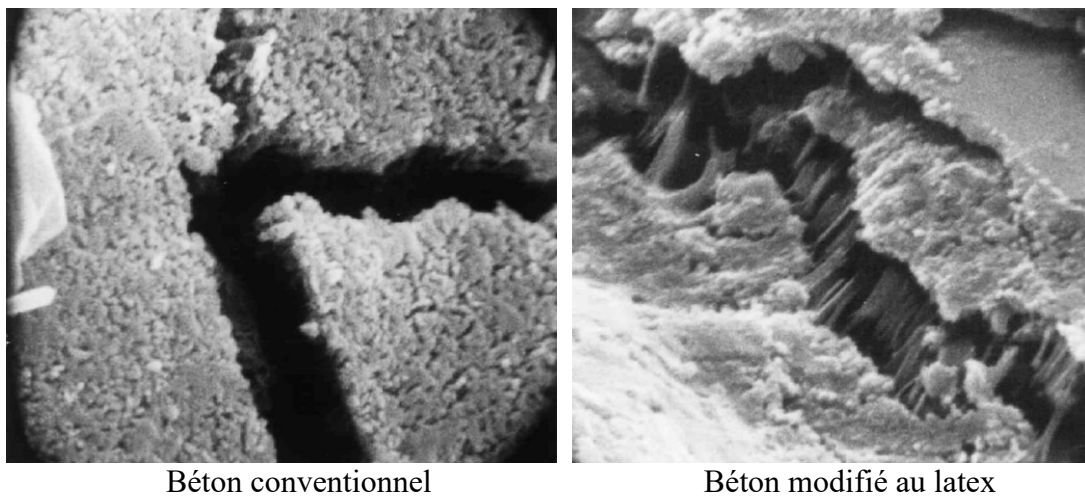


Figure 2-5 : Photographie au microscope électronique à balayage (MEB) des BC et BML (ACI, 2009)

2.2.2. Phénomène de coalescence

La polymérisation est une réaction de formation de chaînes macromoléculaires à partir d'entités plus légères. Habituellement, il s'agit de l'addition activée par réaction chimique ou réaction thermique de monomères entre eux formant un polymère (Robert, 2018). Dans le cas des BML, l'eau contenue dans l'émulsion polymérique est absorbée par la réaction d'hydratation. L'eau s'évapore aussi dû au séchage du béton. Cela force donc la polymérisation à se produire par un phénomène de condensation (Mehta, 1986). L'espace restreint force les particules à former un film uniforme qu'on nommera coalescence (figure 2-6). Lorsque le phénomène de coalescence est amorcé, l'eau interstitielle est prise dans la matrice cimentaire et donc la diminution de l'humidité interne est inhibée. Les propriétés sont bonifiées non seulement par la présence du film de latex dans la comatrice, mais aussi par l'inhibition de la perte d'eau interstitielle contribuant à l'hydratation (Mindess, 2002).

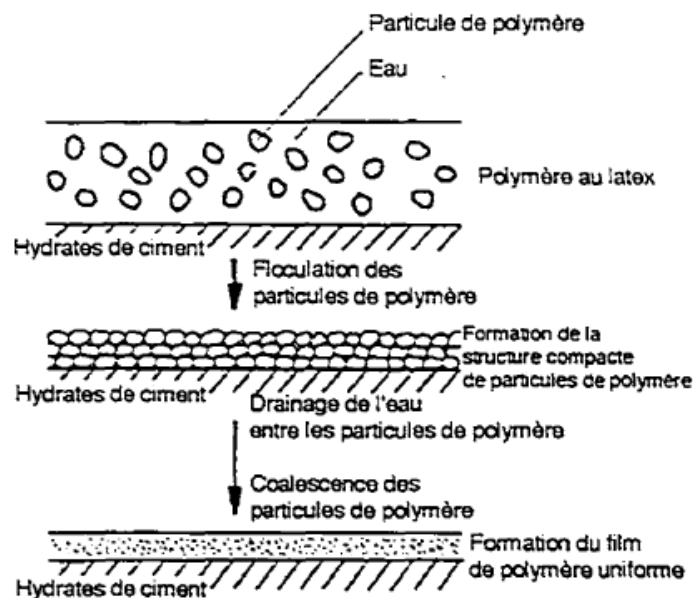


Figure 2-6 : Coalescence du latex (Lapointe, 1996)

2.2.3. Effet sur la zone d'interface pâte-granulat (ITZ)

L'eau contenue dans la pâte tend à se séparer des particules de ciment dû aux contraintes de cisaillement entre la pâte et les agrégats subi lors du malaxage. Ce phénomène crée des régions très étroites près des agrégats avec une concentration plus faible en particules de ciment et une concentration d'eau plus importante. Cette région est la zone d'interface pâte-granulat. (ITZ)

(Thomas et Jennings, 2010). Le latex contribue à densifier cette zone due à l'adhérence accrue avec les granulats. Suite au malaxage, le latex s'installe dans cette zone, car comme mentionné à l'étape 1 de la section 2.2.1, le latex est poussé d'abord dans les zones de vide tel que l'ITZ. La zone d'interface pâte-granat est alors densifiée ce qui rend le chemin préférentiel plus difficile pour le passage de l'eau, des gaz ou des ions (ACI Committee 548, 2009; Gagné, 2017).

Les travaux de Rossignolo portant sur l'influence du latex dans l'ITZ démontrent que l'ajout de 10% de SBR réduit l'épaisseur de l'ITZ de 36%. L'ITZ se retrouvant davantage fractionné comporte plusieurs noyaux de cristallisation d'ettringite. Les cristaux ont moins tendance à cristalliser dans une direction préférentielle. Pour les bétons contenant la fumée de silice et des SBR, une densification graduelle des produits d'hydratation s'effectue dû à la réaction pouzzolanique entre les hydroxydes de calcium et la fumée de silice (João Adriano Rossignolo, 2009). La porosité de la zone est réduite directement à proximité des agrégats, car la région contient davantage de particules de latex. Il s'agit du même mécanisme qui explique pourquoi l'ITZ d'un BC est moins dense dû au rapport E/C plus élevé dans cette zone. Par contre pour un BML, l'eau interstitielle près des granulats est chargée avec une proportion grandissante de particules de latex. Cet accroissement de la concentration de latex provient simplement de l'hydratation des grains de ciment. Ce phénomène consomme donc l'eau en présence et laisse le latex en suspension dans la solution interstitielle. De surcroît, certaines interactions chimiques entre les particules de polymère et les ions Ca^{2+} provenant des produits d'hydratation, démontrées par Sakai et Sugita (1995), modifieraient la quantité et la composition des hydroxydes de calcium (CH) résultant de l'hydratation du ciment. Il y a donc une moins grande quantité d'ions Ca^{2+} disponibles pour la formation de CH (João Adriano Rossignolo, 2009) (Sakai et Sugita, 1995). De plus, les travaux de Rossignolo démontrent aussi l'influence de la fumée de silice sur la zone d'interface pâte-granat. Ces travaux démontrent que l'ajout de 10% de fumée de silice en remplacement du poids de ciment réduit l'ITZ de 36%. La dernière étape de cette étude montre les effets de la combinaison de la fumée de silice et du latex SBR sur la zone d'interface pâte-granat. Pour 5% de SBR et 10% de FS, l'ITZ est réduite de 54%. Pour 10% de SBR et 10% de FS, la réduction atteint à 64%. Les deux composantes ont un effet complémentaire et positif sur la densification de la zone d'interface pâte-granat. Les différents bétons sont présentés à la figure 2-7 (João Adriano Rossignolo, 2009).

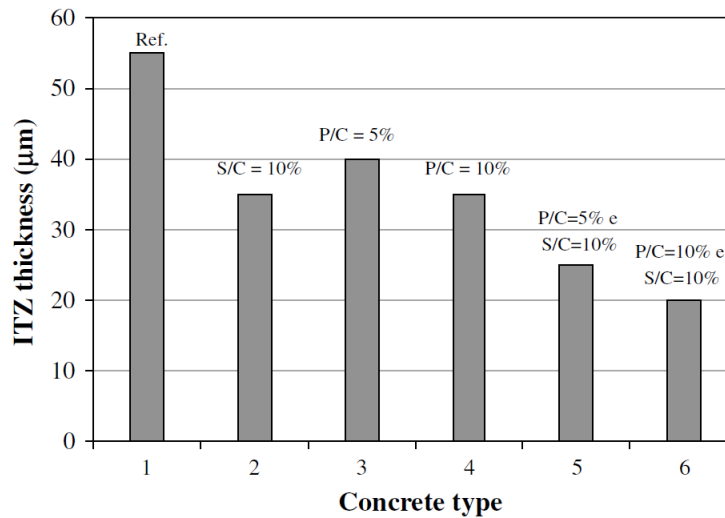


Figure 2-7 : Épaisseur de l'ITZ de plusieurs bétons (João Adriano Rossignolo, 2009)

2.2.4. Mûrissement

Les BML développent leurs propriétés grâce à une cure particulière. Les BML subissent habituellement une cure humide de 24h en laboratoire suivie d'une période de séchage aux conditions ambiantes. Le mûrissement in situ des BML est habituellement de 24 à 48h humide suivi de la période de séchage. Il est important de noter que lorsqu'une importante surface du béton est exposée à l'air, une cure de 72h est recommandée afin de réduire les effets du retrait plastique. Cela permet de développer la maturité du béton avant d'initier la floculation des particules de latex dû à la baisse de saturation interne. Cela accélère le phénomène de coalescence permettant de former un film plus uniforme à l'intérieur de la matrice de béton (Ohama, 1987; Ramakrishnan, 1992). Toutefois, une cure humide courte peut impacter négativement la durabilité au gel-dégel du béton puisqu'il n'y a pas assez de gel de C-S-H créée pour fractionner la porosité capillaire (Gagné, 2017) (Mehta, 1986). C'est pourquoi il est important de trouver un juste milieu entre le mûrissement initial et le séchage. Il est pratique de noter que la diversité des liants utilisés dans les BML crée beaucoup de confusion sur ce compromis.

2.2.5. Efficacité des films de latex

Il existe deux classes d'utilisation de BML au Québec soit les bétons avec 5% de latex et ceux avec 15% de latex. Les BML 5% ont un comportement se rapprochant d'un BC. On utilise les mêmes techniques de cure et des exigences semblables en ce qui concerne l'affaissement, la teneur en air, le \bar{L} ainsi que pour la perméabilité aux ions chlorures. Par contre, les BML 5% sont très adhésifs tout comme les BML 15%. Dans la présente étude, le BML avec 15% latex SBR sera étudié.

2.3. Influence du latex sur les bétons frais

2.3.1. Affaissement

En plus des propriétés mentionnées en début de section, le latex possède aussi des propriétés de plastifiant. Cette propriété provient des tensioactifs permettant d'améliorer la dispersion. La figure 2-8 montre la relation entre l'affaissement et la teneur en latex. Pour un affaissement constant, l'augmentation du pourcentage de latex permet d'utiliser un rapport E/L plus faible. Il est à noter que l'affaissement est mesuré après 5 minutes de repos après l'échantillonnage, car la fluidité des BML diminue immédiatement après le malaxage. Pour un rapport E/L constant, l'augmentation du pourcentage de latex augmente l'affaissement (ACI Committee 548, 2009).

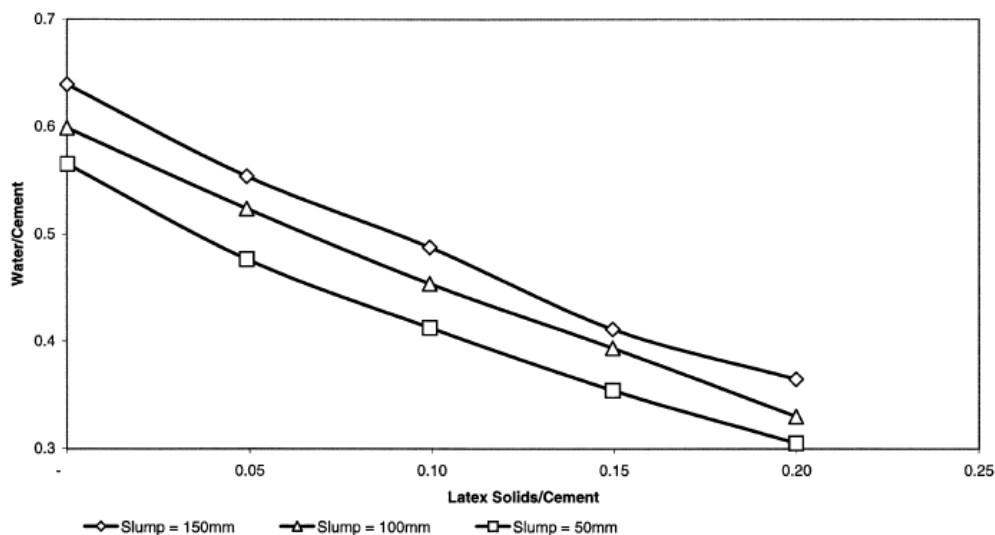


Figure 2-8 : Relation entre la teneur en latex et l'affaissement (ACI Committee 548, 2009)

2.3.2. Entraînement d'air

Le latex possède des propriétés intrinsèques d'entraînement d'air excessif dû aux surfactants utilisés dans la production des latex SBR. Pour contrôler ce phénomène, les latex commerciaux contiennent un agent désentraîneur d'air (ADA). La figure 2-9 présente la relation entre la teneur en air et la quantité d'ADA utilisée dans les latex (ACI Committee 548, 2009). La concentration et l'efficacité des ADA dépendent du type de latex et des tensioactifs.

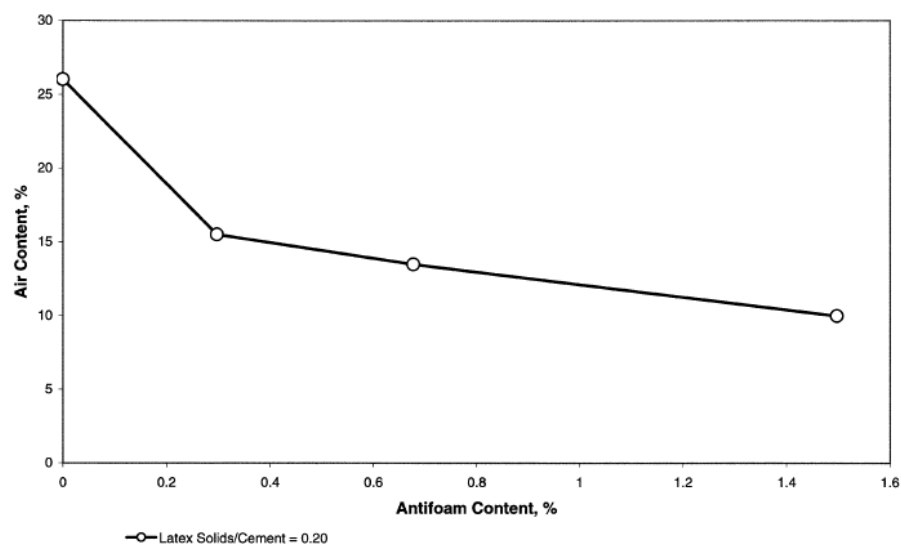


Figure 2-9 : Teneur en air de mortier en fonction de la concentration d'ADA (ACI Committee 548, 2009)

Comme pour un BC, l'augmentation de la teneur en air diminue la résistance à la compression. Selon les études de l'ACI, il n'est pas nécessaire d'utiliser des AEA puisque naturellement les BML entraînent une certaine quantité d'air et le latex procure la protection nécessaire. Dans ce même rapport, il a été montré que les BML n'ont pas toujours le réseau de bulles d'air suffisant pour réussir l'essai de durabilité ASTM C666. Toutefois, des résultats sur plus de 30 ans de service montrent la durabilité des BML aux cycles de gel-dégel. De plus, l'ACI ne recommande aucune spécification en ce qui concerne la teneur en air dû aux bonnes performances de BML (ACI Committee 548, 2009; Bertrand, 2012; Sprinkel, 2016).

2.3.3. Ouvrabilité

Les BML possèdent un temps de prise plus long que les BC. Le temps de prise augmente en fonction du pourcentage de latex jusqu'à un maximum de 10%, ensuite l'ajout de latex ne ralentit plus significativement la prise (figure 2-10). Les BML tendent à former une légère croûte en surface si le béton devient trop sec avant la finition. Cela peut mener au déchirement de la surface fini.

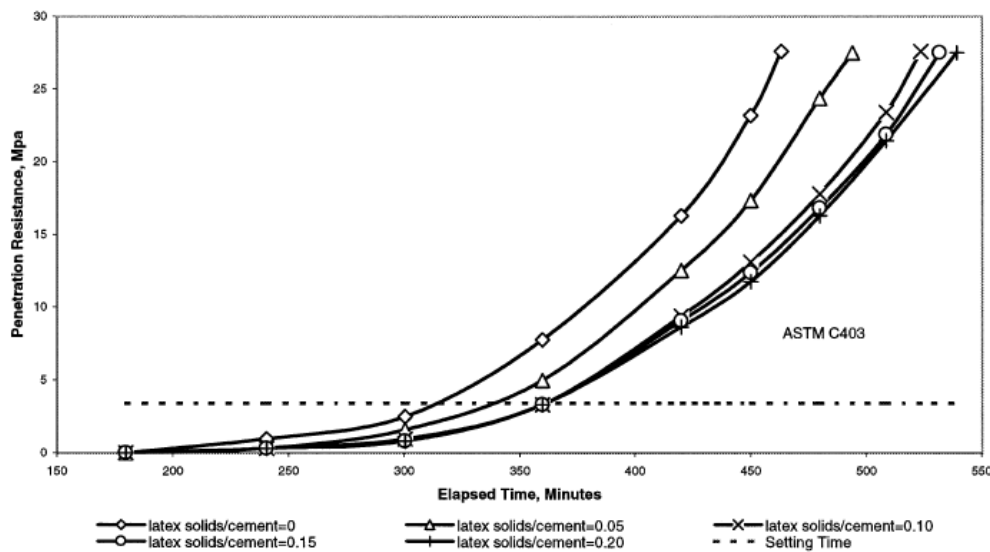


Figure 2-10 : Temps de prise des BML (ACI Committee 548, 2009)

2.4. Influence du latex sur les propriétés durcies

2.4.1. Propriétés mécaniques

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, le latex SBR a peu d'effet sur la résistance à la compression. Dans une étude comparant les propriétés mécaniques d'un BML avec 20% de latex solides à un BC, la résistance à la compression a légèrement baissé, tandis que les résistances en traction et en flexion ont presque doublé (Mehta, 1986). La résistance en traction est fonction du rapport polymère/ciment (P/C). La figure 2-11 montre l'évolution de la résistance en tension en fonction de la quantité de ciment pour différents ratios P/C (ACI Committee 548, 2009; Ohama, 1987).

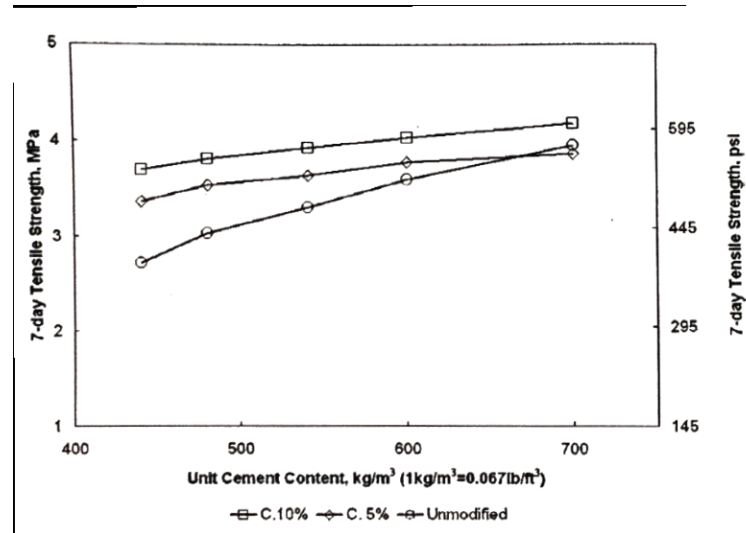


Figure 2-11 : Résistance en traction en fonction du dosage en ciment (ACI Committee 548, 2009)

Les BML possèdent des modules d'élasticité plus faibles, mais une déformation à la rupture importante lors d'essais en traction. Cette valeur élevée indique que plusieurs microfissures se produisent juste avant la rupture. Le film de latex permettrait de réduire la propagation des microfissures puisque les résistances en traction restent élevées malgré la fissuration (Mindess, 2002). Dans le tableau 2-2, Mindess montre l'effet du séchage sur les performances mécaniques. Les BML offrent une résistance en compression plus élevée comparativement à un BC ayant subi le même mûrissement.

Tableau 2-2 : Propriétés mécaniques des BML(Mindess, 2002)

	PC		LMC		
	Polyester	Polymerized MMA	Control		LMC containing styrene-butadiene air-cured
			Moist-cured	Air-cured	
	1:10 polymer/aggregate ratio	1:15			
Compressive strength	18,000	20,000	5800	4500	4800
Tensile strength	2,000	1,500	535	310	620
Flexural strength	5,000	3,000	1070	610	1430
Elastic modulus, $\times 10^6$	5	5.5	3.4	—	1.56

On constate une perte de résistance lorsque le MML est immergé dans l'eau (tableau 2-3). L'adsorption d'eau par le film polymère affaiblit l'intégrité du film. De plus, le pH très élevé du béton peut contribuer à ce phénomène (Mindess, 2002).

Tableau 2-3 : Influence de l'immersion sur les résistances de mortier modifié au latex (Mindess, 2002)

	<i>Strength in MPa (lb/in.²)</i>							
	<i>Compressive</i>		<i>Tensile</i>		<i>Flexural</i>		<i>Shear Bond</i>	
	<i>Dry^a</i>	<i>Wet^b</i>	<i>Dry</i>	<i>Wet</i>	<i>Dry</i>	<i>Wet</i>	<i>Dry</i>	<i>Wet</i>
Control	17 (2500)	30 (4400)	1.5 (220)	2 (300)	4 (600)	5 (700)	0.3 (40)	1 (150)
Styrene-butadiene	35 (5100)	28 (4100)	4 (600)	2.5 (350)	10 (1500)	6.5 (950)	>5 ^d (>700)	2.5 (350)
VC-VC ^c	60 (8700)	50 (7300)	—	—	9 (1300)	7.5 (1100)	>5 ^d (>700)	4.5 (700)
Acrylate	40 (5800)	28 (4100)	6 (900)	3.5 (500)	13 (1900)	7 (200)	>5 ^d (>700)	2.5 (350)
Vinyl acetate	25 (3600)	10 (1500)	5 (700)	0.5 (70)	13 (1900)	2 (300)	>5 ^d (>700)	1 (150)
Epoxy	50 (7300)	48 (7000)	5.5 (800)	5 (700)	11.5 (1650)	11 (1600)	—	—

^a Sand/cement = 3; polymer/cement = 0.2; cured 28 days at 50% RH.

^b Immersed seven days after curing completed, before testing.

^c Vinyl chloride–vinylidene chloride co-polymer.

^d Failure occurs through substrate concrete.

L'adhésion au substrat est un point fort des BML. En effet, plus le ratio polymère-ciment (P/C) augmente plus la liaison est forte. Des essais ont été effectués avec des MML et BML, tous deux ont démontré une résistance améliorée. La figure 2-12 présente les résultats pour les MML. Les échantillons ont été fabriqués en coulant un MML sur une brique de mortier conventionnel séparée en deux. On observe une augmentation d'adhésion d'environ 3 MPa en condition sèche (ACI Committee 548, 2009; Lou A. Kuhlmann, 1990).

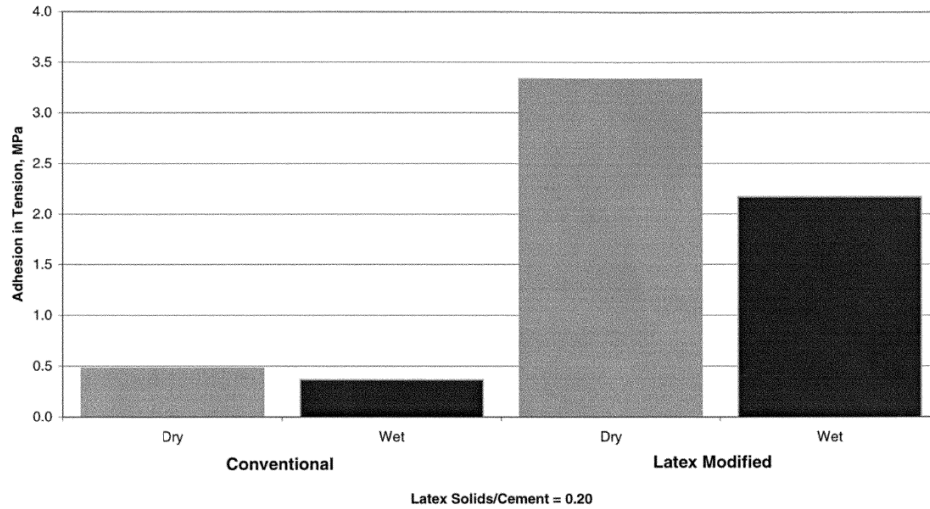


Figure 2-12 : Adhésion de BC et de MML (ACI Committee 548, 2009)

2.4.2. Perméabilités

Absorption d'eau

Les faibles perméabilités à l'eau créées par l'ajout de latex contribuent à minimiser la saturation des pores capillaires. Cette diminution abaisse les pressions osmotiques et hydrauliques lors de l'action du gel-dégel. La diminution de la pression osmotique interne est favorable pour diminuer le phénomène d'écaillage (Yang et al., 2009). De plus, les travaux de Rossignolo montrent que l'augmentation du rapport P/C diminue l'absorption d'eau   28j (Jo o A. Rossignolo et Agnesini, 2004). (figure 2-13)

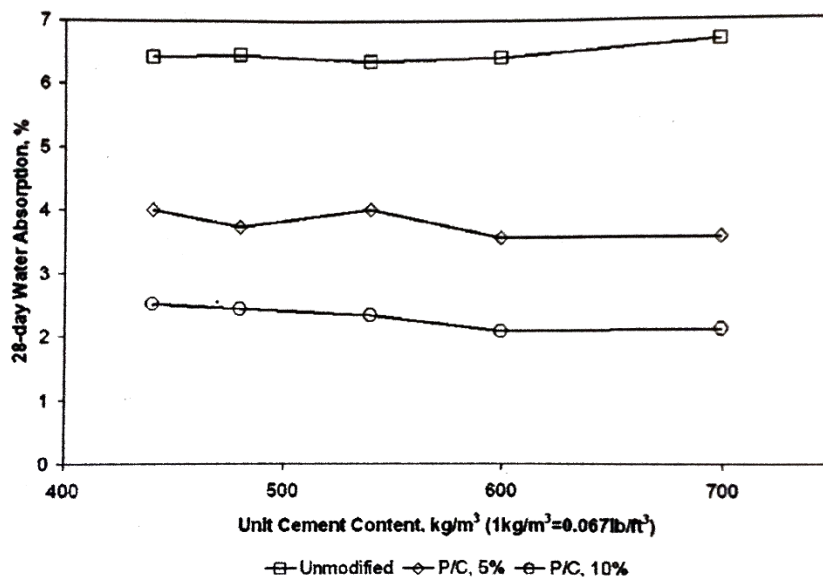


Figure 2-13 : Absorption d'eau de BML en fonction du dosage en ciment (Jo o A. Rossignolo et Agnesini, 2004)

Perméabilité aux ions chlorures

Selon l'étude de Yang et coll. (2009), les SBR ne peuvent pas à eux seuls être une protection efficace aux ions chlorure. L'étude, mesurant la diffusion des ions chlorure, a déterminé les coefficients de diffusion (cm^2/sec) d'un mortier sans modification au latex, d'un film de SBR pure et de deux mortiers modifiés au latex SBR avec des pourcentages de latex différents. Les valeurs de coefficient de diffusion (tableau 2-4) sont les résultats d'une diffusion en état permanent. Son essai a été effectué selon la méthode décrite par Page en 1981 (Zeng, 1996). La méthode de Zeng ne peut être utilisée qu'avec des mortiers ce qui rend les conclusions moins justifiables pour l'application sur un béton. Toutefois, il serait néanmoins pertinent de vérifier si le même système est présent pour les essais de la norme ASTM C1202. Une autre étude confirme celle de Zeng en étudiant le coefficient de diffusion pour des mortiers et des bétons. Le tableau 2-5 montre qu'il existe un gain important pour les latex, lorsqu'utilisés à un pourcentage plus élevé que 10% (Mindess, 2002). Cela exprime mieux la tendance avancée par Yang et coll (Yang et al., 2009).

Tableau 2-4 : Coefficient de diffusion des ions chlorure de différents échantillons (Zeng, 1996)

Échantillon	Coefficient de diffusion des ions chlorure
	cm^2/sec
Mortier conventionnel	101×10^{-9}
Film de latex SBR	113×10^{-9}
Mortier modifié au SBR 10%	69×10^{-9}
Mortier modifié au SBR 20%	44×10^{-9}

Tableau 2-5 : Coefficient de diffusion pour plusieurs latex (adapté de Mindess, 2002)

Type de latex	Ratios Polymère/Ciment	Coefficient de diffusion (m/s)	
		Mortier	Béton
Aucun	-	$6,4 \times 10^{-10}$	$2,2 \times 10^{-10}$
Styrène-butadiène	0,10	$6,4 \times 10^{-10}$	$1,9 \times 10^{-10}$
	0,20	$3,9 \times 10^{-10}$	$0,9 \times 10^{-10}$
Acrylate	0,10	$3,8 \times 10^{-10}$	$0,6 \times 10^{-10}$
	0,20	$2,4 \times 10^{-10}$	$0,6 \times 10^{-10}$
Éthylène-acétate de vinyle	0,10	$4,4 \times 10^{-10}$	$0,8 \times 10^{-10}$
	0,20	$2,4 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-10}$

Kuhlmann et Foor (1984) ont étudié la charge totale en coulombs en fonction de la teneur en air des BML. Les travaux ont été faits avec l'essai ASTM C1202. Il a été démontré que la perméabilité aux ions chlorure du béton n'est pas influencée par la teneur en air durci du béton. Ils ont aussi mesuré l'effet de l'âge des échantillons sur la perméabilité (Kuhlmann et Foor, 1984). Les résultats montrent qu'à 28 jours les résultats varient fortement, mais au-delà de 90 jours les résultats tendent vers une même valeur. Cela est aussi représenté par une étude de Dow Chemical (figure 2-14) sur la perméabilité de différents BML produits en chantier ayant des formulations différentes en ce qui concerne le rapport E/C (ACI Committee 548, 2009).

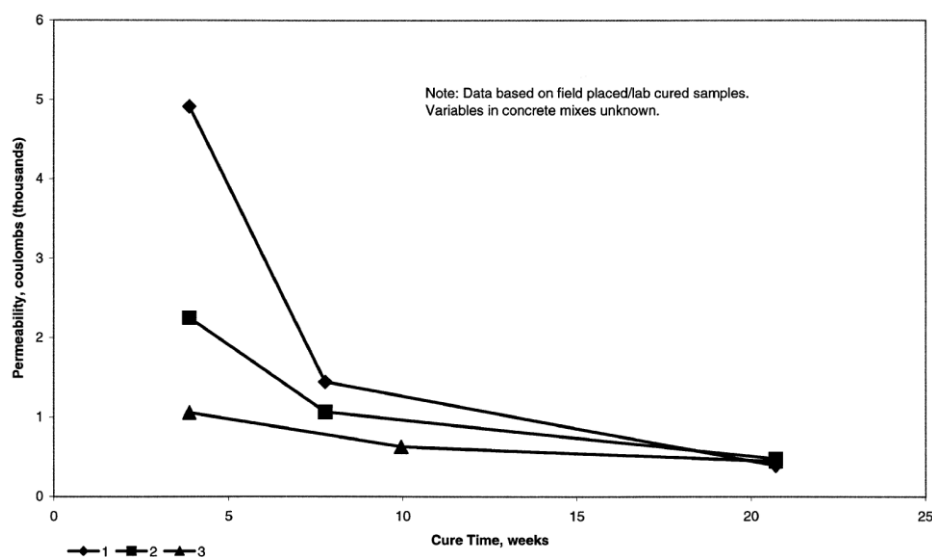


Figure 2-14 : Perméabilité aux ions chlorure en fonction de l'âge du béton (ACI Committee 548, 2009)

Pour des BML formulés avec 15% de latex, 360 kg/m³ de ciment à prise ultra rapide et des ajouts de fumée de silice variant entre 0 et 20% du poids de ciment, l'équipe de Choi, Jeon et Yun (2015) ont obtenu des résultats sous la barre 280 coulombs à 28j à l'essai de perméabilité aux ions chlorure (ASTM C1202). La théorie veut que les cendres volantes réduisent ces perméabilités (Choi et al., 2015). En raison de la réaction pouzzolanique ralentie par l'effet des CV, il est possible de croire que leur impact est significatif à un âge de test plus avancé, par exemple à 56j. De plus, la faible perméabilité aux ions chlorures aide à conserver la concentration d'ions chlorure sous 0,5% en poids de ciment. Cela permet de garder passivées les armatures noyées dans le béton (Gagné, 2017).

2.4.3. Résistance au gel-dégel

Tel que mentionné à la section 2.3.2, les BML n'ont pas toujours un réseau de bulles d'air requis pour réussir les essais ASTM C666 et ils ne performant pas toujours bien à cet essai de laboratoire. Selon les recommandations du comité 548 de l'ACI, le réseau d'air ne joue pas un rôle significatif dans la protection à la fissuration interne des BML puisqu'en service plusieurs BML n'ont pas de problème de durabilité. D'ailleurs, la teneur en air minimum pour résister aux cycles de gel-dégel n'est pas connue. Selon Sprinkel (2016), le BML aura une bonne résistance aux cycles de gel-dégel tant qu'il subit une cure sèche adéquate (ACI Committee 548, 2009).

Une étude de Yun, Kim et Choi a déterminé que la performance au gel-dégel des bétons à l'essai ASTM C666 est améliorée positivement avec l'augmentation du pourcentage de latex introduit dans le mélange (Yun et al., 2004).

2.4.4. Résistance à l'écaillage

Pour un BC, les recherches ont démontré une corrélation entre la durabilité au gel-dégel et le facteur d'espacement du réseau de bulles d'air. En respectant une valeur critique de 200 µm, le béton se retrouve généralement dans une bonne position pour bien performer aux cycles de gel-dégel et à l'écaillage. Dans le cas de l'écaillage, puisque la surface du béton est plus sensible, le facteur d'espacement ne fait pas foi de tout sur la prédiction de la durabilité (Pigeon et Pleau, 1995). Il a été aussi démontré que certains bétons peuvent avoir un facteur d'espacement critique plus élevé et quand même bien performer en condition nordique (Pigeon et Pleau, 1995).

Dans cette optique, Bordeleau, Pigeon et Banthia ont effectué une étude sur la résistance à l'écaillage des BML modifié avec des SBR. En comparaison avec des bétons non modifiés, les BML offrent des durabilités à l'écaillage supérieures. Un ajout de 7,5% de SBR améliore significativement les performances. Leur étude indique aussi que la résistance à l'écaillage d'un BML semble reliée au facteur d'espacement du réseau de bulles d'air et que le facteur critique pour un BML est supérieur à celui d'un BC (Bordeleau et al., 1992).

2.5. Les bétonnières mobiles

Les bétonnières mobiles (figure 2-15) sont des équipements de production de béton reconnus par l'ACI. Elles sont conçues et calibrées pour produire des mélanges constants permettant d'obtenir des rythmes de production variant entre 6 et 46 m³/h. Afin de maintenir les rythmes de production, les temps de malaxage des BM sont très courts. Le malaxage se produit seulement dans la vis sans fin à haute énergie (figure 2-16) située à l'arrière du camion. Dans ce genre d'équipement, le temps de malaxage varie de 30 à 90 secondes. L'ACI recommande un temps de malaxage entre 3 et 5 minutes pour les usines à béton conventionnelles (ACI Committee 548, 2009). Les bétonnières mobiles permettent de couler en petite gâchée, ce qui est un avantage pour les BML, car ils sont rarement coulés en continu. Les BM offrent une plus grande variabilité que les usines puisqu'elles sont dépendantes du calibrage des bennes. Le calibrage doit être fait en fonction des propriétés du matériau (finesse, masse volumique, humidité, granulométrie).



Figure 2-15 : Bétonnière mobile



Figure 2-16 : Vis sans fin

Larose et Pigeon (1988) ont étudié les caractéristiques du réseau de bulles d'air produit par BM et des usines conventionnelles. Les caractéristiques du réseau de bulles d'air produit par les BM se révèlent assez homogènes. Le temps de malaxage trop court ne permet pas de produire un facteur d'espacement sous les 200 μm . Cela ne laisse pas assez de temps au AEA d'agir pleinement. Larose et Pigeon indiquent qu'il est possible d'obtenir, avec une bétonnière mobile, un réseau de bulles d'air semblable à ceux produits en usine. Par contre, la teneur en air frais visée du béton doit être supérieure à la valeur visée en usine. La figure 2-17 montre que pour une même teneur en air, les bétons provenant de BM ont des surfaces volumiques plus faibles. À faible teneur en air du béton frais, les BM présentent des facteurs d'espacement supérieurs à ceux provenant des usines à béton (figures 2-18 et 2-19) (Larose et Pigeon, 1988).

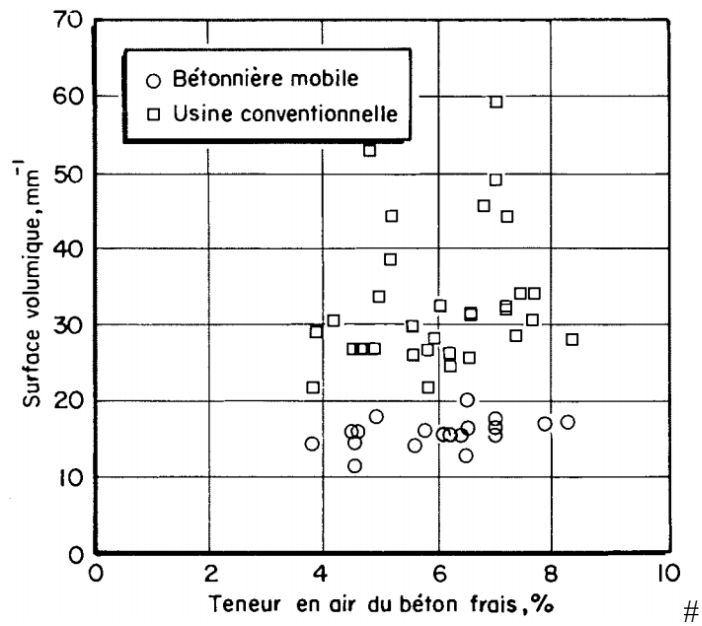


Figure 2-17 : Surface volumique en fonction de la teneur en air frais (Larose et Pigeon, 1988)

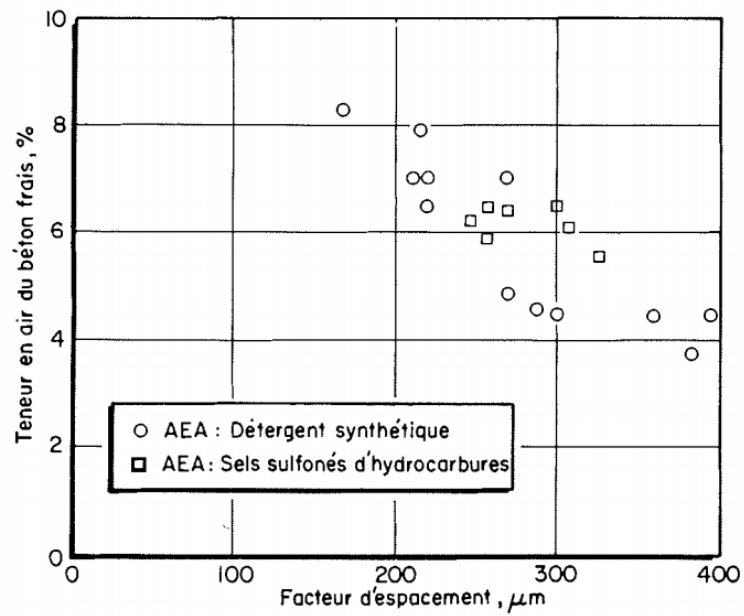
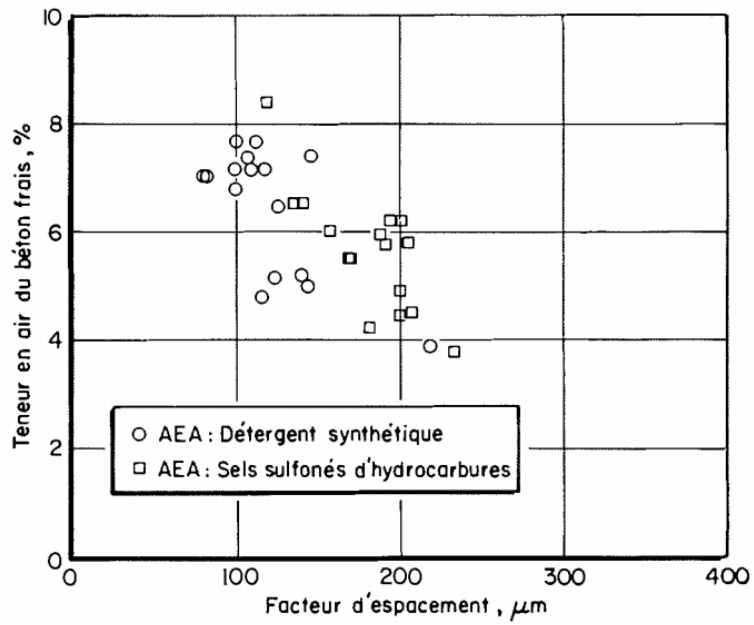


Figure 2-18 : Relation entre la teneur en air frais et le facteur d'espacement pour des bétons produit en bétonnière mobile (Larose et Pigeon, 1988)



CHAPITRE 3 : OBJECTIF DE LA RECHERCHE ET MÉTHODOLOGIE

3.1. Contexte global du projet et problématique

Dans le but de développer des matériaux efficaces pour la réparation, des bétons modifiés au latex ont été créés durant les années 1970. L'ajout de latex améliore l'adhésion du BML sur le substrat, améliore la résistance à la traction et diminue les perméabilités (eau et ions chlorures). Toutes ces caractéristiques font en sorte que les réparations faites avec les BML ont prouvé leur durabilité depuis plus de trente ans. Les BML, essentiellement utilisés comme béton de réparation, sont principalement produits en petit volume à l'aide de bétonnière mobile. Malgré les avantages qu'offre ce genre d'équipement, les bétonnières mobiles peuvent produire des bétons dont les caractéristiques sont parfois plus variables. Généralement, les rapports E/L et la teneur en air peuvent être ajustés durant la coulée de béton.

Les BML ont des caractéristiques de performance variable face aux essais normalisés de durabilité au gel-dégel (ASTM C666) et à l'écaillage (ASTM C672) ainsi que de perméabilité aux ions chlorure (ASTM C1202). Cette situation, parfois présente dans la littérature, est par contre peu documentée. De plus, les effets du conditionnement (cure, rapport E/C et teneur en air) des BML aux cycles de gel-dégel et à l'écaillage constitués de différents liants (ciment GU, GUb-F/SF, RapidSet) sont peu étudiés. Par conséquent, il convient de mener une étude portant sur la question suivante : « Quelles sont les relations entre les caractéristiques du béton (cure, \bar{L} , rapport E/C) et la durabilité au climat nordique des BML? » Avec cette information, il sera alors possible de justifier les exigences de conditionnement actuelles et d'adapter celles-ci si nécessaire.

3.2. Objectif général et objectifs spécifiques

L'objectif principal du projet est d'améliorer la compréhension de la durabilité au gel-dégel, à l'écaillage et à la perméabilité aux ions chlorure des BML produits en bétonnière mobile. De cela découlera un second objectif principal soit de proposer un conditionnement optimisé aux BML si nécessaire. Pour répondre aux objectifs précédents, un certain nombre de paramètres seront analysés afin de comprendre l'influence individuelle de ceux-ci sur la durabilité du béton

modifié au latex. Donc, au terme du projet, il sera possible d'évaluer l'influence des paramètres suivants :

- Type de liant (GU, GUb-F/SF, HEb-SF, RapidSet)
- Rapport E/L (0,30 à 0,40)
- Prolongement de la cure humide (1 jour jusqu'à 14 jours)
- Teneur en air (3% à 12%)
- Facteur d'espacement des bulles d'air (150 μm à 800 μm)
- Méthode de production (laboratoire et bétonnière mobile)

À ces objectifs principaux se rajoutent des objectifs secondaires. Ceux-ci sont en lien avec l'exécution du projet. Ces objectifs sont les suivants :

- Développer une méthode de malaxage en laboratoire répliquant celle des bétonnières mobiles.
- Identifier un moyen de produire des bétons ayant des teneurs en air variant entre 3% et 12%.
- Extraire des échantillons de béton d'une dalle provenant d'un pont en service depuis plus de 25 ans et analyser ses caractéristiques de durabilité.

3.3. Méthodologie

3.3.1. Hypothèses et justifications

Les formulations de BML sont normées et classées au Québec selon la codification suivante au chapitre 3 du Tome VII de la norme 3101 (annexe A). Les BML à 5% de latex et à 15% de latex sont respectivement les types XVI-5 et XVI-15. La norme a été mise à jour durant le projet (15 décembre 2017). Dans le cadre du projet, les critères présentés au tableau 3-1 ont été fixés.

Tableau 3-1 : Hypothèses de formulation des bétons en laboratoire

Type de liant	GU	GUb-SF/F	RapidSet
Masse de liant	390 kg/m ³		
Rapport E/L	0,30 jusqu'à un maximum de 0,40		
F'c à 28 jours	35		
Pourcentage de latex	15%		
Teneur en air	3% à 9%		
Affaissement	(170 ± 30) mm		
Dimension gros granulat	Calibre 5-14		
Adjuvant	Aucun		

Le rapport E/L est contrôlé entre 0,30 et 0,40. Dans la pratique, il est plutôt rare que les bétonnières mobiles atteignent la valeur maximale de 0,40. La teneur en air varie entre 3 et 9% d'air puisque la norme 3101 du MTMDET varie depuis 2016. En décembre 2015, l'exigence était de 3 à 7%. En décembre 2016, l'exigence était 5 à 9% et, en décembre 2017, la norme demande 4 à 8%. Donc, le projet comparera les teneurs en air d'un minimum de 3% jusqu'à 9% et plus dépendamment des essais. Normalement les BML sont produits sans adjuvant, par contre dans le but d'obtenir les volumes d'air nécessaires, des AEA et ADA seront utilisés dans certains cas.

3.3.2. Procédures expérimentales

Le projet comporte trois phases présentées à la figure 3-1. La première phase est une caractérisation de BML en condition de service sur une longue période. Celle-ci sert de planche de référence permettant d'obtenir les valeurs de durabilité pour les essais actuels. Les échantillons visés pour le prélèvement auront un âge d'environ 30 ans. La deuxième consiste en le prélèvement de BML produit en chantier. Il sera alors possible d'obtenir les propriétés plastiques, mécaniques et de durabilité pour des BML produits de nos jours. La dernière phase consiste en la production des différents bétons en environnement contrôlé. Cela sera fait en laboratoire à l'université de Sherbrooke et dans les installations de BMQ. Cette étape permettra de modifier certains paramètres de formulation et de mûrissement afin d'en évaluer leur influence. Il est important de noter que tous les bétons de chantier ont été produits à l'aide d'une

bétonnière mobile. L'annexe B présente l'échéancier général du projet. Au cours des phases de caractérisation, les bétons analysés subiront le même ensemble de tests qui est présenté au tableau 3-2. Cet ensemble sera nommé séquence de base (Seq.Base). Cette séquence peut être bonifiée par d'autres essais. Afin de caractériser la durabilité des bétons, les bétons sélectionnés subiront les essais de la séquence de base et de la séquence de durabilité (Seq.Dura) présentées au tableau 3-2.

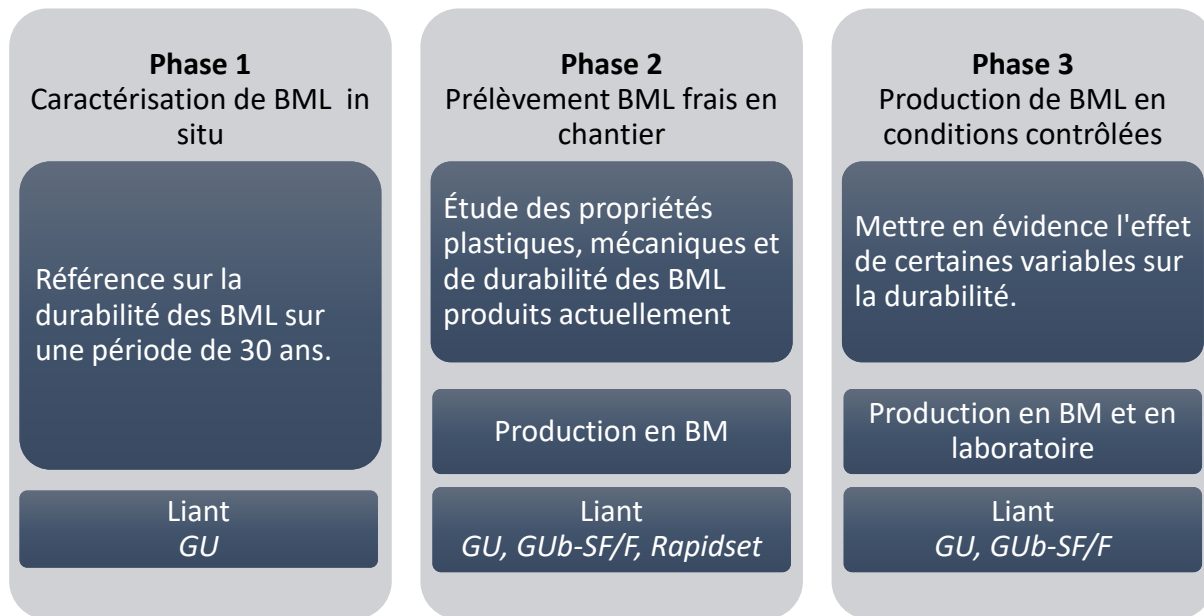


Figure 3-1 : Organisation des phases

Tableau 3-2 : Séquences d'essais

Type	Essai	Norme	Âge
Seq.Base	Résistance à la compression	CSA A23.2-9C	7j, 28j
	Perméabilité aux ions chlorure	ASTM C1202	28j, 56j
	Vides perméables et absorption	ASTM C642	28j
	Essai de fendage (essai brésilien)	CSA A23.2-13C	28j
	\bar{L}	ASTM C457	>7j
Seq.Dura	Écaillage	NQ2621-905	28j
	Gel-dégel	ASTM C666	14j

Phase 1 : Étude de la durabilité in situ

Cette première phase permet de documenter la durabilité des BML âgés de plus de 30 ans. Celle-ci sert de référence sur la durabilité réelle de ce type de béton dans un climat nordique. L'ouvrage choisi devra avoir subi une exposition représentative d'un climat nordique. Les échantillons de cette phase subiront les essais de la Seq.Base et de la Seq.Dura en plus de l'essai d'arrachement ASTM C1583.

Tableau 3-3 : Formulation et essais de la phase 1

Propriétés	Unités	Valeurs
Liant	-	GU
Pourcentage de latex	%	15%
Adjuvant	-	Aucun
Essais	-	Seq.Base, Seq.Dura + Pull-off - ASTM C1583

Phase 2 : Étude des BML produits en chantier

La phase 2 permet de compléter les données recueillies de la phase avec des bétons produits actuellement. Cette étape comporte la fabrication en chantier d'un minimum de 6 bétons, soit un minimum de deux par type de liant. Plus d'un béton est prélevé par liant dans le but d'observer la variabilité pouvant être produite par la bétonnière mobile. Il sera alors possible de faire la caractérisation des produits du BML frais et du BML durci. La caractérisation du béton durci comprend les essais mécaniques ainsi que les essais de durabilité. (tableau 3-4) Les résultats de cette phase permettront de créer une base de données de référence pour la production des bétons en conditions contrôlées (phase 3).

Dans le cadre de cette phase, un essai a été conduit afin de vérifier la stabilité du réseau d'air et l'évolution des propriétés plastiques. Pour ce faire, un BML a été produit en bétonnière mobile pour ensuite être transporté dans une bétonnière conventionnelle. Le liant utilisé pour cet essai est le liant GU.

Tableau 3-4 : Formulation et essais de la phase 2

Propriétés	Unités	Valeurs
Liant	-	GU, GUb-SF/F, RapidSet
Mélangeur	-	Bétonnière mobile
Pourcentage de latex	%	15%
F’c à 28 jours	MPa	35
Eau/Liant	-	0,40 max
Teneur en air	%	3 à 9
Affaissement	mm	170 ± 30
Adjuvant	-	Aucun, AEA, Retardateur de prise
Essais	-	Seq.Base + Seq.Dura

Phase 3 : Production de BML en conditions contrôlées

Cette phase permet d’étudier l’influence des variables citées à la section 3.2 dans un environnement contrôlé. Les bétons produits en laboratoire ont un homologue produit en chantier avec une bétonnière mobile afin de pouvoir documenter les variations entre les deux malaxages. Cette portion du projet se divise en cinq étapes : caractérisation des mélanges, influence de la durée de mûrissement humide, influence de l’air entraîné, influence du rapport E/L et l’influence du type de liant. Chacune des étapes suivantes sera effectuée avec les trois liants différents (GU, GUb-F/SF et RapidSet).

Tableau 3-5 : Formulation et essais de la phase 3

Propriétés	Unités	Valeurs
Liant	-	GU, GUb-SF/F
Mélangeur	-	Malaxeur planétaire Bétonnière mobile
Pourcentage de latex	%	15%
F’c à 28 jours	MPa	35
Eau/Liant	-	0,30 à 0,35
Teneur en air	%	3 à 9
Affaissement	mm	170 ± 30
Adjuvant	-	Aucun, AEA, DEA, Retardateur de prise
Essais	-	Selon les sous-phases

Phase 3.1 : Caractérisation des mélanges

Cette phase porte sur la caractérisation des mélanges de BML en conditions contrôlées. Les bétons subiront la cure latex soit 24h 100% humide suivi d’une période de séchage. Les bétons produits en laboratoire ont été conçus pour un rapport eau/liant de 0,30 et 0,35 afin de représenter le spectre de bétons pouvant être produits en chantier. Un total de 10 combinaisons sera produit. Les essais effectués pour cette phase sont présentés au tableau 3-6. La caractérisation des mélanges produits en laboratoire permettra de confirmer que la séquence de malaxage est adéquate pour répliquer le malaxage des bétonnières mobiles.

Tableau 3-6 : Formulation et essais de la phase 3.1

Propriétés	Unités	Valeurs
Liant	-	GU, GUb-SF/F
Mélangeur	-	Malaxeur planétaire
Pourcentage de latex	%	15%
F’c à 28 jours	MPa	35
Eau/Liant	-	0,30 à 0,35
Teneur en air	%	3 à 9
Affaissement	mm	170 ± 30
Adjuvant	-	Aucun
Mûrissement	-	Latex
Essais	-	Seq.Base

Phase 3.2 : Influence du mûrissement humide

Cette phase comporte plusieurs itérations de cure pour les échantillons de BML produits en laboratoire et en chantier. Afin d’évaluer l’influence du prolongement de la cure humide à 100% HR sur les BML, 3 gâchées par liant ont été produites lors d’une phase préliminaire ne comportant pas les essais de durabilité. Cette étape du projet sert à identifier si l’allongement de la cure humide peut être bénéfique pour les essais de durabilité. Ces cures sont utilisées à la phase 3.2 dans le but de réduire le nombre d’échantillons à traiter.

Tableau 3-7 : Formulation et essais de la phase préliminaire 3.2

Propriétés	Unités	Valeurs
Nombre de gâchée	-	3 par liant
Liant	-	GU et GUb-SF/F
Mélangeur	-	Malaxeur planétaire
Pourcentage de latex	%	15%
F’c à 28 jours	MPa	35
Eau/Liant	-	0,30 (GU) et 0,32 (GUb-SF/F)
Teneur en air	%	3 à 9
Affaissement	mm	170 ± 30
Adjuvant	-	Aucun
Mûrissement	-	1j 100% HR + séchage à 50% HR 3j 100% HR + séchage à 50% HR 7j 100% HR + séchage à 50% HR
Essais	-	Seq.Base

La phase 3.2 comprend la confection de BML en laboratoire et en bétonnière mobile. Cette fois-ci, les essais de durabilité seront faits en fonction des cures sélectionnées à la phase préliminaire.

Tableau 3-8 : Formulation et essais de la phase 3.2

Propriétés	Unités	Valeurs
Nombre de gâchée	-	Min. 1 par liant
Liant	-	GU, GUb-SF/F
Mélangeur	-	Malaxeur planétaire Bétonnière mobile
Pourcentage de latex	%	15%
F’c à 28 jours	MPa	35
Eau/Liant	-	0,30 à 0,35
Teneur en air	%	3 à 9
Affaissement	mm	170 ± 30
Adjuvant	-	Aucun
Mûrissement	-	En fonction de la phase préliminaire
Essais	-	Seq.Base + Seq.Dura

Phase 3.3 : Influence de l’entraînement d’air (teneur en air, facteur d’espacement)

Dans cette troisième phase, le but est d’étudier l’influence de l’air entraîné, le comportement des agents entraîneur d’air et le comportement du \bar{L} en fonction du pourcentage d’air entraîné. Dans l’objectif d’obtenir des teneurs en air faibles, certaines formulations contiennent un dosage d’agent désentraîneur d’air pour contrer l’apport naturel d’air par l’émulsion de latex. D’autre part, le dosage de l’AEA a été ajusté afin de produire des bétons ayant des teneurs en air supplémentaires. Chaque itération de formulation (ciment et dose d’AEA ou ADA) a été effectuée pour des rapports E/L de 0,30 et 0,35.

Tableau 3-9 : Formulation et essais de la phase 3.3

Propriétés	Unités	Valeurs
Nombre de gâchée	-	4 / liant / mode de malaxage
Liant	-	GU et GUb-SF/F
Mélangeur	-	Malaxeur planétaire Bétonnière mobile
Pourcentage de latex	%	15%
F’c à 28 jours	MPa	35
Eau/Liant	-	0,30 à 0,35
Teneur en air	%	3 à 9
Affaissement	mm	170 ± 30
Adjuvant	-	AEA et ADA
Mûrissement	-	En fonction de la phase préliminaire
Essais	-	Seq.Base + Seq.Dura

Phase 3.4 : Influence du rapport E/L

Cette phase permet l’évaluation de l’influence du rapport E/L sur la durabilité des BML. Pour ce faire, les bétons de la phase 3.3 seront utilisés pour cette phase (rapport E/L de 0,30 et de 0,35).

Phase 3.5 : Influence du liant

L’influence du liant sera évaluée au travers la phase 2 et la phase 3 puisque les essais sont répliqués avec tous les liants du projet. Il n’est donc pas nécessaire de planifier des essais supplémentaires.

CHAPITRE 4 : MATÉRIAUX ET PROCÉDURES

4.1. Matériaux

4.1.1. Liants

Dans le cadre de ce projet, trois types de liants ont été utilisés, un ciment Portland (GU), un ciment ternaire avec cendre volante et fumée de silice (GUb-SF/FA) et un ciment sulfoalumineux à prise ultrarapide (RapidSet). Les liants GU et Gub-SF/FA répondent à la norme CSA A3000-18 : Cementitious materials compendium alors que le liant RapidSet répond aux exigences de la norme ASTM C1600 : Standard Specification for Rapid Hardening Hydraulic Cement. Pour des raisons de confidentialité, la composition des ciments n'est pas présentée dans ce rapport.

4.1.2. Latex

Le latex utilisé dans le cadre de l'étude est de type styrène-butadiène, soit 66% styrène et 34% butadiène. Pour des raisons de confidentialité, le nom commercial du latex utilisé, ainsi que les fiches techniques ne sont pas présentées dans ce rapport. Le latex est entreposé dans un réservoir GRV de 1000L (figure 4-1) avant d'être transvidé dans des contenants de 20L (figure 4-2) le latex est agité avec l'outil présenté à la figure 4-3.



Figure 4-1 : Réservoir GRV de latex

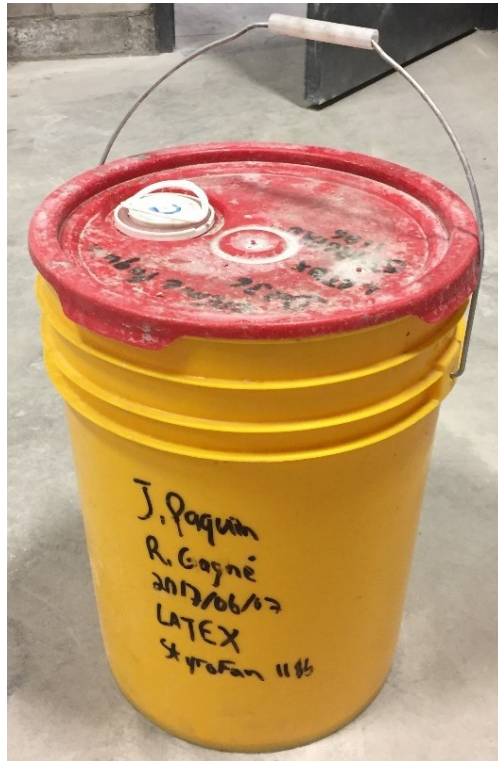


Figure 4-2 : Contenant de 20L utilisé pour la préparation des gâchées



Figure 4-3 : Extrémité de l'agitateur

Le SBR contient une concentration de 48% de matière solide. Les manipulations en laboratoire ont trouvé un volume de 46% de solide. Cette valeur a été obtenue selon la procédure d'essai du

Ministry of Transport of Ontario LS-413. Celle-ci est inspirée fortement de celle de l'ASTM C494, par contre elle permet de faire l'analyse plus rapidement, elle requiert une quantité plus faible de latex et elle se fait sans l'utilisation du sable d'Ottawa. Le tableau 4-1 présente les différences entre les deux méthodes. La figure 4-4 montre les échantillons après l'essai. La procédure complète de l'essai est présentée à l'annexe C.

Tableau 4-1 : Comparaison entre MTO LS-413 et ASTM C494

	MTO LS-413	ASTM C494
Matériel	<ul style="list-style-type: none"> · Plat d'aluminium de 60 mm de diamètre · 1,2g de latex 	<ul style="list-style-type: none"> · Plat de verre de 60 mm · 25-30g de sable d'Ottawa · 4 mL de latex
Appareil de séchage	Étuve	Étuve
Température de séchage	$140 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$105 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Temps de séchage	2 h	$17 \pm 1/4 \text{ h}$



Figure 4-4 : Échantillon de latex après le séchage (LS-413)

Une analyse au FTIR a aussi été effectuée sur les échantillons de latex utilisés en laboratoire et en chantier. Cela a permis d'analyser les pics de styrène et de butadiène dans l'émulsion de latex. La figure 4-5 présente les résultats du latex entreposé en laboratoire. La courbe du FTIR du latex de chantier n'est pas présentée puisque les résultats sont semblables. Les valeurs importantes à valider concernant les latex styrène-butadiène sont les pics de styrène visibles pour les nombres d'ondes entre 754 et 697 ainsi que les pics de butadiène visibles pour les nombres d'ondes 966 et 913.

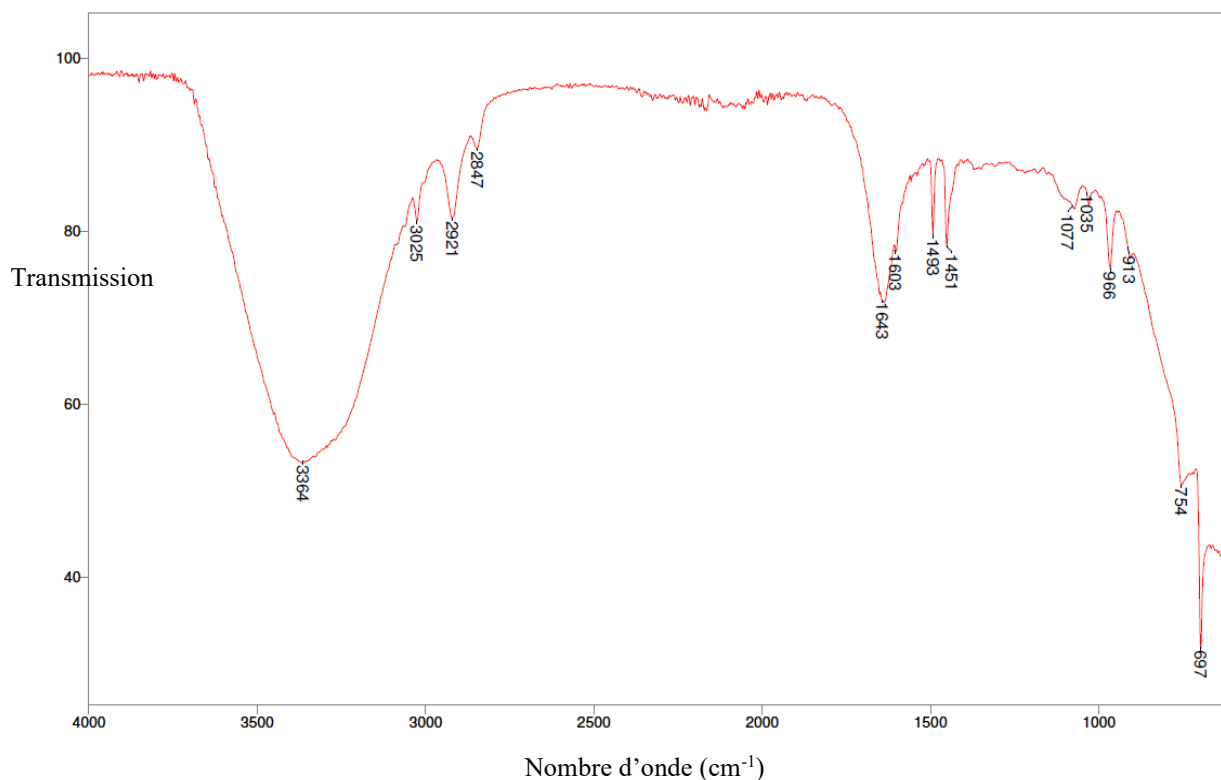


Figure 4-5 : FTIR du latex en laboratoire

4.1.3. Adjuvants

L'agent entraîneur d'air utilisé pour cette étude est le MasterAir AE210 de BASF. L'agent désentraîneur d'air utilisé pour le projet est le AFE-1520 de Xiameter qui est une émulsion à base de silicone.

4.1.4. Granulat fin

Un sable siliceux naturel provenant de la région de Lanaudière a été utilisé pour produire tous les bétons. La densité à l'état SSS (Saturée Surface sèche) était de 2,71. Le pourcentage massique d'adsorption du sable était de 0,55. Le module de finesse du sable était de 2,56. La fiche technique du granulat est disponible à l'annexe D. En laboratoire, le granulat a été entreposé dans des « big bags » de polypropylène tissé. En chantier, le granulat est entreposé à l'extérieur sous un abri. La granulométrie du granulat fin est présentée au tableau 4-2. Les analyses présentées dans l'annexe démontrent la conformité du granulat à la norme CSA A23.1.

Tableau 4-2 : Granulométrie, module de finesse, densité et absorption du granulat fin

Ouverture de tamis	Tamisats cumulés (%)
10 mm	100
5 mm	95
2,5 mm	88
1,25 mm	75
0,630 mm	54
0,315 mm	25
0,160 mm	7
0,08 mm	2,4
<u>Module finesse</u>	2,56
<u>Densité SSS</u>	2,705
<u>Absorption</u>	0,55

4.1.5. Gros granulat

Une pierre granitique naturelle provenant de la région des Laurentides a été utilisée pour produire tous les bétons. La densité à l'état SSS est de 2,76 et le pourcentage massique d'adsorption est de 0,44. La fiche technique du granulat est disponible à l'annexe D. En laboratoire, le granulat a été entreposé dans des « big bags » de polypropylène tissé. En chantier, le granulat est entreposé à l'extérieur sous un abri. La granulométrie de la pierre est présentée au tableau 4-3. L'analyse présentée en annexe démontre la conformité à la norme CSA A23.1.

Tableau 4-3 : Granulométrie, densité et absorption du gros granulat

Tamisats cumulés (%)	Pierre 5-14
20 mm	100
14 mm	97
10 mm	69
5 mm	11
2,5 mm	4
0,08 mm	1.3
<u>Densité SSS</u>	2,761
<u>Absorption</u>	0,44

4.2. Procédures

4.2.1. Procédures de gâchage

Les bétons produits en laboratoire ont été fabriqués à l'aide d'un mélangeur de type *pan mixer* d'une capacité de 120 L (figure 4-6). Deux séquences de gâchage ont été utilisées durant l'étude. La première séquence, ici nommé séquence A, s'effectue en un temps total de 4 minutes. La deuxième séquence B, ici nommé séquence B, s'effectue en 3 minutes et le malaxeur est réglé à une vitesse plus faible que pour la séquence A. Le but de la seconde séquence est de minimiser le volume d'air entraîné mécaniquement. Les procédures sont présentées dans les tableaux suivants (tableau 4-4). Les bétons fabriqués à l'aide d'une bétonnière mobile (BBM) ont une séquence de malaxage différente. Les granulats, le ciment, l'eau, les adjuvants et le latex sont tous ajoutés en même temps dans la cuve (figure 4-7). Le mélange se fait dans la visse sans fin comme mentionné à la section 2.5.



Figure 4-6 : Mélangeur du laboratoire

Tableau 4-4 : Séquence de malaxage

Étapes	Temps (sec)	
	Séquence A	Séquence B
1 . Rinçage du malaxeur, introduction du sable. Malaxage	30	30
2 . Mesure de la teneur en eau et correction des masses de sable et d'eau si nécessaire.	-	-
3 . Introduction de la pierre, de 50% (A) ou 20% (B) de l'eau et de l'AEA ou de l'ADA. Malaxage	30	30
4 . Introduction du liant. Malaxage	60	30
5 . Ajout du latex et de l'eau restante. Malaxage	150	120
6 . Fin du malaxage	-	-
7 . Mesure de la teneur en air et de la masse volumique. Temps d'attente de 5 minutes avant de faire la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.	-	-
8 . Si les valeurs ne correspondent pas à celles désirées, correction par ajout d'eau et/ou AEA et/ou ADA.	-	-
Total	270	210



Figure 4-7 : Cuve de la bétonnière mobile

4.2.2. Échantillonnage

Les échantillons ont été prélevés selon les méthodes suivantes. La mise en place du béton dans la moule a été réalisée selon la norme CSA A23.1 pour les cylindres. Les prismes de gel-dégel ont été réalisés selon les normes ASTM C 666 et ASTM C192. La norme BNQ 2621-905 a été respectée pour la mise en place du béton des plaques d'écaillage. Les cylindres 100 x 200 mm ont été remplis en trois couches pilonnées en 20 coups. Après la séquence de pilonnage, les moules ont été légèrement frappés à l'aide d'une masse de caoutchouc afin de refermer les vides. Les prismes de gel-dégel ont été remplis en deux couches pilonnées à raison de 38 coups par couche. Après la séquence de pilonnage, les moules ont été légèrement frappés à l'aide d'une masse de caoutchouc afin de refermer les vides. Les plaques d'écaillages 250 x 250 x 75 mm ont été fabriqués selon les exigences de la norme BNQ 2621-905 annexe B. Un géotextile de polypropylène non tissé d'une épaisseur de (7 ± 1) mm et d'une masse surfacique égale à (900 ± 50) g/m² a été déposé au fond du moule. Le géotextile était propre et n'avait jamais servi avant le bétonnage. Le béton des plaques a été mis en place en une couche et pilonné à raison de 51

coups par couche. Après la séquence de pilonnage, les moules ont été légèrement frappés à l'aide d'une masse de caoutchouc afin de refermer les vides. Le surplus de béton a ensuite été régalié avec une barre d'arasement en bois prémouillé de 40 mm x 85 mm x 600 mm. La finition des plaques a été faite par le même opérateur durant toute la durée de projet. Une fois la fabrication de tous les échantillons terminés, ceux-ci ont été protégés à l'aide d'une pellicule de type polythène. Le nombre d'échantillons produit varie selon les formulations.

4.2.3. Mûrissement

Tous les échantillons ont été démoulés (24 ± 2) h après le contact eau-ciment. Durant l'étude trois séquences de cure ont été utilisées, la première est une cure humide dès le démoulage jusqu'à échéance de l'essai. Cette cure sera nommée simplement « cure 100% humide » (CHum). La seconde est un séchage des échantillons dans une chambre à 50% HR dès le démoulage jusqu'aux essais. Actuellement les normes n'exigent pas un contrôle de l'humidité relative lors du séchage. Cette cure est celle actuellement utilisée pour les BML et elle sera nommée « cure latex » (CLat). La troisième est un hybride entre les deux premières où les échantillons ont une période dans la chambre humide avant d'entamer le séchage. Cette cure sera nommée « cure hybride » (CHyb). L'étape du séchage est importante, car elle permet la polymérisation du latex. Le type de mûrissement choisi varie selon les formulations de chaque phase. Le mûrissement des cylindres, des prismes de gel-dégel et des plaques d'écaillage est présenté au tableau 4-5. La norme ASTM C666 demande pour les BC une cure de 14 jours humides, mais celle-ci fait une exception pour les BML en acceptant la cure latex (1 jour humide et 13 jours de séchage).

Les éprouvettes utilisées pour la lecture du réseau de bulle d'air à l'état durci ont subi un mûrissement minimum de 7 jours pour permettre à la pâte de s'hydrater suffisamment pour obtenir un polissage satisfaisant.

Tableau 4-5 : Comparaison des mûrissements selon les échantillons

Type d'échantillon	Dimension		Mûrissement		
			Jour 100% HR	Jour 50% HR	Notes
Cylindres	100 x 200 mm	CLat	1	28	Sauf pour la phase préliminaire 3.2
Gel-dégel	75 x 75 x 350 mm	CLat	1	13	Cure acceptée par le MTQ.
		CHyb	7	7	-
Écaillage	250 x 250 x 75 mm	CLat	1	27	-
		CHyb	14	14	Cure BNQ 2621-905

4.2.4. Formulations

Les prochaines sections présentent les formulations utilisées durant l'étude. En raison de l'espace limité dans les cabinets de gel-dégel, seulement deux prismes ont été prélevés. Dû au nombre assez important de bétons analysés, un système de nomenclature a été créé (figure 4-8, tableau 4-6 et tableau 4-7).

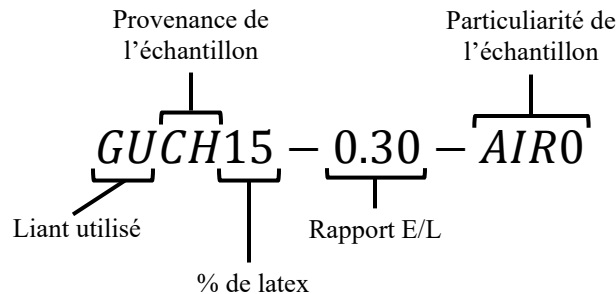


Figure 4-8 : Identification de la nomenclature

Tableau 4-6 : Description des termes de la nomenclature

Catégorie	Terme	Description
Liant	GU	Ciment GU
	TER	Ciment ternaire
	RS	Ciment RapidSet
Provenance	LB	Produit en laboratoire
	CH	Prélevé en chantier (bétonnière mobile)
	RM	Prélevé en chantier (bétonnière conventionnelle)
	Si aucun terme, considérer une production en laboratoire.	
% de latex SBR	Nombre	Indique le pourcentage de latex Si aucun terme, il n'y a pas de SBR dans le béton.
Rapport E/L	Nombre	Représente le rapport E/L
Particularité	Variable en fonction de la série d'échantillonnage. Présenté à la suite des formulations.	

Tableau 4-7 : Particularité des formulations

Terme	Définition
HUM	Les échantillons ont subi la cure 100% humide.
1-X	Les échantillons ont subi une cure hybride où la cure humide a duré 1 jour.
3-X	Les échantillons ont subi une cure hybride où la cure humide a duré 3 jours.
7-X	Les échantillons ont subi une cure hybride où la cure humide a duré 7 jours.
Y-X	Les échantillons ont subi différentes cures hybrides. La durée de la cure humide varie et la valeur de Y est mentionné avant les résultats.
ILE VERTE	Échantillons provenant du pont de l'Île Verte.
VAL	Échantillons provenant d'un chantier à Val-Alain, Qc.
TRIN	Échantillons fabriqués avec un latex d'un fournisseur différent.
ÉTÉ17	Échantillons produits durant l'été 2017.
AUT17	Échantillons produits durant l'automne 2017.
D	Échantillons prélevés au début du malaxage dans une BC.
F	Échantillons prélevés à la fin du malaxage dans une BC.
XDEF	Formulation avec l'ADA Xiameter.
DEF	Formulation avec l'ADA BASF.
AIR0	Formulation sans ADA et sans AEA.
AIR1	Formulation avec 1 dose d'AEA.
AIR4	Formulation avec 4 doses d'AEA.

Phase 1 : Étude de la durabilité in situ

L'objectif de la phase 1 est d'obtenir les données de référence sur la durabilité réelle des BML. Le BML visé a subi des conditions de service représentatives des conditions de service en climat nordique. Deux sections de la dalle du tablier du pont de l'Île-Verte, situé dans la région de Laval, ont été prélevées (figure 4-9 et 4-10). La structure construite en 1960 a subi une réfection majeure en 1989 avec l'ajout d'une chape de BML. La qualité de la chape de réparation n'est pas la cause de la démolition de la structure. Le béton de réparation et le substrat ont été analysés dans cette phase. Les échantillons prélevés sont présentés à la figure 4-11. Considérant une épaisseur minimale de 65 mm pour la chape de BML, les carottes prélevées ont un diamètre de 32 mm afin d'effectuer les essais de compression et de 50 mm pour les essais d'arrachement. Les dimensions des échantillons pour les autres essais prévus respectent les normes applicables. Les données présentées au tableau 4-8 montrent bien les effets des SBR sur le réseau de bulles d'air. Malgré le 6,9% d'air durci, le facteur d'espacement reste élevé, ce qui n'est pas le cas pour le BC en substrat.

De plus, le Tableau 4-9 présente les résultats de caractérisation de divers BML effectué par le partenaire industriel de cette étude. Ceux-ci de comparatif aux résultats obtenus dans la phase 1.



Figure 4-9 : Dalle du pont de l'île verte



Figure 4-10 : Section de dalle



Figure 4-11 : Échantillons prélevés du tablier du pont de l'Île Verte

Tableau 4-8 : Formulation des bétons de la phase 1

		GUCH - ILE VERTE	GUCH15 - ILE VERTE
Dosage des constituants			
Latex	[%]	0	15
Caractéristique des bétons durcis			
Facteur d'espacement	[μm]	261	445
Surface spécifique	[mm^{-1}]	17	9,9
Volume d'air durci	[%]	6,5	6,9
Résistance à la compression			
29 ans	[MPa]	39,2	70,5

Tableau 4-9 : Caractérisation de BML de diverses structures

Structures	Résistance à la compression	Teneur en air durci	Facteur d'espacement des vides d'air	Résistance à l'arrachement	Perméabilité aux ions chlorure
	(MPa)	(%)	(μm)	(MPa)	(Coulombs)
Gatineau, QC 2009	62,2 (25 ans)	2,0 (25 ans)	676 (25 ans)	2,3 1,7 (5 et 25 ans)	172 (25 ans)
St-Gilles de Lothbinière, QC 2010	53,9 (23 ans)	7,2 (23 ans)	394 502 586 (23, 30 et 30 ans)	1,2 2,4 (23 et 30 ans)	154 (23 ans)
40E-15N, Montréal, QC 2011	61,8 (20 ans)	5,4 (20 ans)	224 (20 ans)	-	105 (20 ans)
Route 60, Lynnhaven Inlet, VA 1996, 1999, 2006	-	-	-	1,8 2,4 1,9 (10 mois, 3 et 10 ans)	703 333 130 (10 mois, 3 et 10 ans)
Rankin Bridge, Windsor, ON 2011	38,8 (27 ans)	2,4 (27 ans)	624 (27 ans)	1,3 1,2 (27 et 27 ans)	249 (27 ans)
Pont Île Verte, Laval, QC 2018	70,2 (29 ans)	2,5 (29 ans)	(29 ans)	70,2 (29 ans)	70,2 (29 ans)

Phase 2 : Étude des BML produits en chantier

L'objectif de la phase 2 est de déterminer les caractéristiques à l'état frais et durci ainsi que les caractéristiques de durabilité des BML produits actuellement dans les bétonnières mobiles. Les trois liants ont été utilisés. Le tableau 4-10 présente le dosage des constituants et les caractéristiques à l'état frais et durci des bétons de la phase 2. Dû à la production en bétonnière mobile, la valeur du rapport E/L est exprimée en fonction du maximum permis soit 0,40. Par expérience, lorsque les conditions météorologiques sont favorables, le rapport E/L des bétons est d'environ 0,33 pour le liant GU et de 0,35 pour le liant ternaire. Le rapport E/L du béton RapidSet est situé sous 0,4. Les bétons ont tous une résistance en compression supérieure à 35 MPa. Le volume d'air frais est compris entre 3,5% et 6,8 %. Les facteurs d'espacement de ces bétons varient entre 340 μm et 509 μm . Les dosages (eau et adjuvant) ont été ajustés afin de satisfaire les caractéristiques plastiques exigées par le MTQ.

Afin d'étudier la stabilité du réseau de vides d'air son évolution dans le temps, un essai a été réalisé chez le partenaire industriel où un BML a été produit en bétonnière mobile pour être

entreposé dans une bétonnière de type Ready-Mix. Les propriétés du béton frais ont été analysées à plusieurs intervalles de temps et des prélèvements ont été effectués à la sortie de la bétonnière mobile et à la fin de l'essai. Des pertes importantes d'affaissement avaient été observées à la fin de l'essai. Les échantillons GURM15-D et GURM15-F représentent respectivement le BML prélevé au début et à la fin de l'essai.

Tableau 4-10 : Formulation des bétons de la phase 2

		GUCH15-ÉTÉ17	GUCH15-AUT17	GURM15-D	GURM15-F	GU15-TRIN	TERCH15-ÉTÉ17	TERCH15-AUT17	TERCH15-VAL	RSCH15-HUM
Dosage des constituants										
Eau	$[kg/m^3]$	55	55	55	55	55	61	55	55	60
Ciment	$[kg/m^3]$	390	390	390	390	390	390	390	390	390
Sable	$[kg/m^3]$	914	944	944	944	944	884	876	876	877
Pierre	$[kg/m^3]$	870	835	835	835	835	845	900	900	840
Latex	$[L/m^3]$	121	121	121	121	121	122	121	121	122
AEA	$[mL/100kg\ ciment]$	100	46	46	46	46	46	46	46	0
Caractéristique des bétons frais										0.40 max
Rapport E/L		0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,35	0,35	0,35	
Volume d'air	$[\%]$	6,8	5,0	4,5	3,5	4,5	6,0	4,5	6,4	5,3
Affaissement	$[mm]$	175	190	145	50	200	200	160	110	250
Masse volumique	$[kg/m^3]$	2206	2335	2374	2401	2356	2134	2321	2255	2272
Caractéristique des bétons durcis										
Facteur d'espacement	$[mm]$	470	509	423	399	378	386	463	340	474
Surface spécifique	$[mm^{-1}]$	13,1	11,5	9,5	10,8	12,7	14,5	12,9	12,1	15,3
Volume d'air durci	$[\%]$	3,9	4,0	4,8	4,6	4,4	5,0	4,0	5,5	3,0
Résistance à la compression <i>Cure latex</i>										
7 jours	$[MPa]$	35,7	35,0	47,1	44,8	38,6	34,5	39,0	32,9	64,0
28 jours	$[MPa]$	42.7	43.6	55.8	52.7	46.0	48.9	52.5	42.6	65.2

*Cette formulation est la seule ayant un pourcentage de 5% de latavex Cette recette est la seule qui contient un superplastifiant 235 mL/100 kg de ciment

Au total 10 formulations ont été produites, dont 5 avec le liant GU, 4 avec le liant ternaire et 1 avec le liant RapidSet. Seulement une formulation avec le ciment RS a été nécessaire, car en pratique, ce liant provoque moins de variabilité sur les essais de durabilité.

Phase 3 : Production de BML en conditions contrôlées

La phase 3 concerne la production en environnement contrôlé de BML pour isoler certaines variables et analyser leur influence. Plusieurs bétons ont été utilisés pour analyser plus d'une variable, alors il est possible de voir la même formulation dans plus d'une sous-phase. La phase 3 comporte 5 sous-phases qui ont été effectuées au laboratoire et en chantier.

Sous-phase 3.1 : Caractérisation

Le but de la phase 3.1 est de déterminer les caractéristiques à l'état frais et durci des BML, ainsi que les caractéristiques de durabilité des BML produits actuellement. Cette phase a aussi permis de confirmer la séquence de malaxage en laboratoire. Seulement les liants GU et ternaire ont été utilisés, le liant RS a seulement été utilisé avec la bétonnière mobile. Le tableau 4-11 présente le dosage des constituants et les caractéristiques à l'état frais et durci des bétons de la phase 3.1. Un rapport E/L de 0,30 a été utilisé pour le liant GU, car il s'agit du minimum possible avec cette formulation permettant d'obtenir un béton de qualité et rencontrant les critères plastiques. Pour le liant ternaire, un rapport E/L de 0,32 est le minimum possible en laboratoire. Le volume d'air frais varie entre 5,7% et 7,3%. L'affaissement varie entre 130 mm et 230 mm, ces valeurs sortent légèrement de la tolérance de la norme, toutefois il est plus important de conserver le même rapport E/L pour fin de comparaison.

Tableau 4-11 : Formulation des bétons de la phase 3.1

		<u>Liant GU</u>				<u>Liant ternaire</u>	
		GURF15-0.30-1-X	GU15-0.30-AIR0	GU15-0.35-AIR0	GU15-0.32-AIR0	TER15-0.32-AIR0	TERCH15-0.35-AIR0
Dosage des constituants							
Eau	<i>[kg/m³]</i>	55	55	72	62	61	72
Ciment	<i>[kg/m³]</i>	390	393	384	387	398	383
Sable	<i>[kg/m³]</i>	943	951	932	938	900	869
Pierre	<i>[kg/m³]</i>	834	842	825	830	862	830
Latex	<i>[L/m³]</i>	122	122	118	120	124	120
AEA	<i>[mL/100kg ciment]</i>	0	0	0	0	0	0
DEA	<i>[mL/100kg ciment]</i>	0	0	0	0	0	0
Caractéristique des bétons frais							
Rapport E/L		0,30	0,30	0,35	0,32	0,32	0,35
Volume d'air	<i>[%]</i>	7,3	5,9	6,8	6	5,7	6,3
Affaissement	<i>[mm]</i>	210	150	230	180	130	190
Masse volumique	<i>[kg/m³]</i>	2343	2363	2331	2346	2339	2274
Caractéristique des bétons durcis							
Facteur d'espacement	<i>[μm]</i>	-	302	254	424	266	413
Surface spécifique	<i>[mm⁻¹]</i>	-	18,4	21	10,5	18,3	8,3
Volume d'air durci	<i>[%]</i>	-	3,5	4,3	4,3	3,6	5,2
Résistance à la compression							
7 jours	<i>[MPa]</i>	38,3	36,6	29,5	38,1	39,6	35
28 jours	<i>[MPa]</i>	46,6	47,8	38,7	48	50,6	43,1

Sous-phase 3.2 : Influence du mûrissement humide

L'objectif de la phase 3.2 est de quantifier le prolongement du mûrissement humide. Puisque les essais de durabilité nécessitent jusqu'à environ 3 mois à compléter, une phase préliminaire sans essai de durabilité a été faite en laboratoire. Le tableau 4-12 présente les formulations. Les résultats de cette phase préliminaire permettront de choisir quelle cure pourrait être pertinente pour les essais de durabilité.

Comme à la phase 3.1, le rapport E/L est de 0,30 pour le liant GU et de 0,32 pour liant ternaire. Le volume d'air frais varie entre 4,5% et 7,6%. L'affaissement varie entre 150 mm et 210 mm, ces valeurs sortent légèrement de la tolérance de la norme, toutefois il est plus important de conserver le même rapport E/L pour fin de comparaison. Le mélange GURF15-0.30-Y-X est la même formulation, mais celui-ci a subi trois cures différentes. Cette formulation permet de confirmer les résultats avancés par les 4 autres mélanges avec le liant GU. Les résultats pour le liant ternaire étaient suffisamment cohérents, donc il n'a pas été nécessaire de faire une formulation supplémentaire.

Tableau 4-12 : Formulation des bétons de la phase préliminaire 3.2

		GURF15-0.30-HUM	GURF15-0.30-1-X	GURF15-0.30-3-X	GURF15-0.30-7-X	GURF15-0.30-Y-X	TERRF15-0.30-1-X	TERRF15-0.30-3-X	TERRF15-0.30-7-X		
Dosage des constituants											
Eau	[kg/m³]	54	55	55	55	55	61	60	61		
Ciment	[kg/m³]	387	390	394	391	392	387	385	388		
Sable	[kg/m³]	939	943	952	944	947	877	872	880		
Pierre	[kg/m³]	829	834	842	835	838	838	833	841		
Latex	[kg/m³]	122	122	123	122	121	121	120	121		
AEA	[mL/100kg ciment]	0	0	0	0	0	0	0	0		
Caractéristique des bétons frais											
Rapport E/L		0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,32	0,32	0,32		
Volume d'air	[%]	4,5	7,3	6,0	7,6	5,7	6,0	7,0	6,0		
Affaissement	[mm]	150	210	170	175	160	190	200	160		
Masse volumique	[kg/m³]	2331	2343	2366	2346	2351	2316	2302	2324		
Résistance à la compression											
						Y=1	Y=3	Y=7			
3 jours	[MPa]	36,2	32,6	36,8	-	-	-	-	28,3	27,2	-
7 jours	[MPa]	41,9	38,3	45,3	40,3	40,0	40,8	38,9	37,6	37,7	36,6
9 jours	[MPa]	-	-	-	45,1	-	-	-	-	-	-
14 jours	[MPa]	45,7	43,5	50,0	48,0	44,7	45,7	46,2	43,2	42,8	44,6
28 jours	[MPa]	46,6	46,6	54,2	53,9	48,8	50,1	51,3	49,2	50,3	51,7
56 jours	[MPa]	49,1	51,0	58,6	60,2	-	-	-	52,5	53,0	58,6
91 jours	[MPa]	53,7	54,4	61,2	63,8	-	-	-	58,0	57,7	61,1

En fonction des résultats obtenus, seulement deux cures ont été choisies afin d'optimiser le nombre d'analyses en fonction de la capacité des appareils de gel-dégel. La cure latex et la cure hybride 7 jours humide ont été choisies. Les cures ont été appliquées sur les essais de durabilité des formulations de la phase 3.3. Il faut noter aussi que cette modification de cure a été faite que sur les échantillons produits en laboratoire. Les formulations sont présentées à la phase 3.3.

Sous-phase 3.3 : Influence de l'entraînement d'air

Le but de la phase 3.3 est d'étudier l'entraînement d'air naturel des latex, les caractéristiques du réseau de bulles d'air, le comportement des agents entraîneurs d'air. Les liants GU et ternaïre ont été utilisés pour cette phase. Le tableau 4-13 montre le dosage des constituants et les caractéristiques des bétons fabriqués avec le liant GU en laboratoire. Le tableau 4-14 présente les mêmes informations pour le liant ternaïre en laboratoire. Le tableau 4-15 présente les mêmes informations pour le liant GU et ternaïre produit en bétonnière mobile. La plage de rapport E/L est entre 0,30 et 0,35 pour le liant GU et entre 0,32 et 0,35 pour le liant ternaïre. Le dosage de l'AEA a varié entre 0 à 333 mL/100kg de ciment et le dosage de l'ADA a varié entre 602 et 1000 mL/100kg de ciment pour obtenir des volumes d'air compris entre 2,9% et 10,7%. Cela a permis produire des facteurs d'espacement compris entre 146 μm et 676 μm .

Tableau 4-13 : Formulation des bétons de la phase 3.3 - Liant GU laboratoire

		GU15-0.30-XDEF	GU15-0.30-DEF	GU15-0.30-AIR0	GU15-0.30-AIR1	GU15-0.30-AIR4	GU15-0.35-XDEF	GU15-0.35-DEF	GU15-0.35-AIR0	GU15-0.35-AIR1	GU15-0.35-AIR4
Dosage des constituants											
Eau	<i>[kg/m³]</i>	55	54	55	53	54	76	73	72	71	72
Ciment	<i>[kg/m³]</i>	403	385	393	379	379	395	384	384	381	378
Sable	<i>[kg/m³]</i>	978	933	951	918	921	958	931	932	922	915
Pierre	<i>[kg/m³]</i>	865	825	842	812	814	848	824	825	816	811
Latex	<i>[L/m³]</i>	125	120	122	117	118	123	119	118	117	116
AEA	<i>[mL/100kg ciment]</i>	0	0	0	45	291	0	0	0	46	197
DEA	<i>[mL/100kg ciment]</i>	1000	602	0	0	0	1000	630	0	0	0
Caractéristique des bétons frais											
Rapport E/L		0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Volume d'air	<i>[%]</i>	3,4	7,8	5,9	8,9	9,6	3,0	6,0	6,8	8,0	9,0
Affaissement	<i>[mm]</i>	90	200	150	200	170	190	225	230	210	225
Masse volumique	<i>[kg/m³]</i>	2408	2316	2363	2279	2286	2388	2330	2331	2299	2286
Caractéristique des bétons durcis											
Facteur d'espacement	<i>[µm]</i>	611	261	302	176	161	572	328	254	191	166
Surface spécifique	<i>[mm⁻¹]</i>	9,4	19,2	18,4	26,6	28,3	9,7	14,9	21	24,5	26,8
Volume d'air durci	<i>[%]</i>	2,8	5,5	3,5	5,7	6,1	2,5	5,2	4,3	5,8	6,7
Résistance à la compression											
7 jours	<i>[MPa]</i>	38,4	34,7	36,6	31,2	35,2	31,7	32,4	29,5	30,8	27,7
28 jours	<i>[MPa]</i>	47,7	45,4	47,8	40,8	44,9	39,1	42,8	38,7	38,8	35,5

Tableau 4-14 : Formulation des bétons de la phase 3.3 - Liant ternaire laboratoire

		TER15-0.32-XDEF	TER15-0.32-DEF	TER15-0.32-AIR0	TER15-0.32-AIR1	TER15-0.32-AIR4
Dosage des constituants						
Eau	$[kg/m^3]$	64	64	60	64	56
Ciment	$[kg/m^3]$	401	394	398	387	378
Sable	$[kg/m^3]$	908	892	900	878	864
Pierre	$[kg/m^3]$	868	854	862	839	821
Latex	$[L/m^3]$	125	123	124	121	119
AEA	$[mL/100kg\ ciment]$	0	0	0	49	201
DEA	$[mL/100kg\ ciment]$	1000	694	0	0	0
Caractéristique des bétons frais						
Rapport E/L		0,32	0,32	0,31	0,33	0,31
Volume d'air	$[\%]$	3,4	5,8	5,7	7,0	6,8
Affaissement	$[mm]$	100	210	130	200	170
Masse volumique	$[kg/m^3]$	2366	2317	2339	2288	2262
Caractéristique des bétons durcis						
Facteur d'espacement	$[mm]$	557	299	266	285	229
Surface spécifique	$[mm^{-1}]$	11,3	15,2	18,3	15,3	19,3
Volume d'air	$[\%]$	2,3	4,8	3,6	5,8	5,6
Résistance à la compression						
7 jours	$[MPa]$	41,1	34,4	39,6	38,3	31,7
28 jours	$[MPa]$	47,2	44,3	50,6	44,2	44,9

Tableau 4-15 : Formulation des bétons de la phase 3.3 -Bétonnière mobile

		<u>Liant GU</u>				<u>Liant ternaire</u>			
		GUCH15-DEF	GUCH15-AIR0	GUCH15-AIR1	GUCH15-AIR4	TERCH15-DEF	TERCH15-AIR0	TERCH15-AIR1	TERCH15-AIR4
Dosage des constituants									
Eau	<i>[kg/m³]</i>	63	62	60	58	79	72	72	62
Ciment	<i>[kg/m³]</i>	394	387	377	362	394	383	380	367
Sable	<i>[kg/m³]</i>	956	938	914	879	893	869	860	832
Pierre	<i>[kg/m³]</i>	845	830	809	778	854	830	822	796
Latex	<i>[L/m³]</i>	122	120	117	112	123	120	119	115
AEA	<i>[mL/100kg ciment]</i>	0	0	46	333	0	0	46	333
DEA	<i>[mL/100kg ciment]</i>	1000	0	0	0	1000	0	0	0
Caractéristique des bétons frais									
Rapport E/L		0,32	0,32	0,32	0,32	0,36	0,35	0,35	0,33
Volume d'air	<i>[%]</i>	3,7	6,0	7,2	10,7	2,9	6,3	7,2	10,3
Affaissement	<i>[mm]</i>	150	180	185	195	200	190	220	140
Masse volumique	<i>[kg/m³]</i>	2389	2346	2285	2198	2342	2274	2251	2171
Caractéristique des bétons durcis									
Facteur									
d'espacement	<i>[mm]</i>	565	424	354	158	676	413	252	146
Surface spécifique	<i>[mm⁻¹]</i>	8,1	10,5	12,7	15,4	8,4	8,3	13,4	23,3
Volume d'air durci	<i>[%]</i>	3,3	4,3	4,5	8,3	2,6	5,2	5,7	7,3
Résistance à la compression									
7 jours	<i>[MPa]</i>	40,9	38,1	38,6	32,8	35,2	35	33,1	31,7
28 jours	<i>[MPa]</i>	49,7	48	46,9	39	44,9	43,1	41,9	40,7

Sous-phase 3.4 : Influence du rapport E/L

L'objectif de la phase 3.4 est d'étudier l'influence du rapport E/L sur les caractéristiques plastiques et durcies des BML. L'étude du rapport E/L sur la durabilité est aussi au cœur de cette phase. Aucune nouvelle formulation n'est nécessaire, car les bétons présentés précédemment (tableau 4-11, 4-12 et 4-13) offre une variation du rapport E/L.

Sous-phase 3.5 : Influence du liant

L'objectif de la phase 3.5 est d'étudier l'influence du liant sur les caractéristiques plastiques et durcies des BML. L'étude du liant sur la durabilité est aussi au cœur de cette phase. Aucune nouvelle formulation n'est nécessaire, car les différents liants ont été utilisés dans les bétons présentés précédemment (tableau 4-8 à 4-13).

CHAPITRE 5 : RÉSULTATS

5.1. Introduction

Dans ce chapitre les résultats bruts sont présentés pour les bétons formulés au chapitre précédent. Les résultats de chaque phase du projet sont exposés pour chaque propriété autant mécanique que de durabilité. Cela permet de suivre l'influence des paramètres de formulation pour une propriété précise. Les résultats présentés couvrent la phase 1 et 2 du projet ainsi que les sous-phases 3.1, 3.2 et 3.3. Les sous-phases 3.4 et 3.5 n'ont pas besoin de résultats distinctifs puisque leur analyse est basée sur les résultats des autres sous-phases.

5.2. Propriétés mécaniques

Phase 1 : Étude de la durabilité in situ

Les prélèvements faits sur la dalle de l'Île verte ont permis d'établir les propriétés mécaniques de référence pour un BML après 29 ans de mise en service. Le tableau 5-1 présente les résistances à la compression obtenues ainsi que les résultats de l'essai d'arrachement. On constate que les deux bétons dépassent l'exigence de 35 MPa en compression. Concernant l'essai d'arrachement, la rupture s'est soit produite dans le substrat ou à l'interface substrat/BML ce qui ne met pas en cause la qualité du BML.

Tableau 5-1 : Résultats des propriétés mécaniques de la phase 1

Résistance à la compression	[MPa]	Substrat	39,2
		BML	70,5
Essai d'arrachement	[MPa]	Rupture du substrat	2,18
		Rupture à l'interface	5,02

Phase 2 : Étude des BML produits en chantier

Toutes les résistances à la compression des bétons fabriqués dans le cadre de la phase 2 ont obtenu une résistance supérieure à 35 MPa à 28 jours. Les résistances sont comprises entre 40 MPa et 65,2 MPa pour des volumes d'air variant de 4,5% à 6,8%. Les résistances obtenues avec le liant RapidSet sont les plus élevées et elles sont obtenues à très jeune âge. Les bétons fabriqués avec le liant ternaire présentent des résistances plus élevées à 28j que ceux faits avec le liant GU. (figure 5-1)

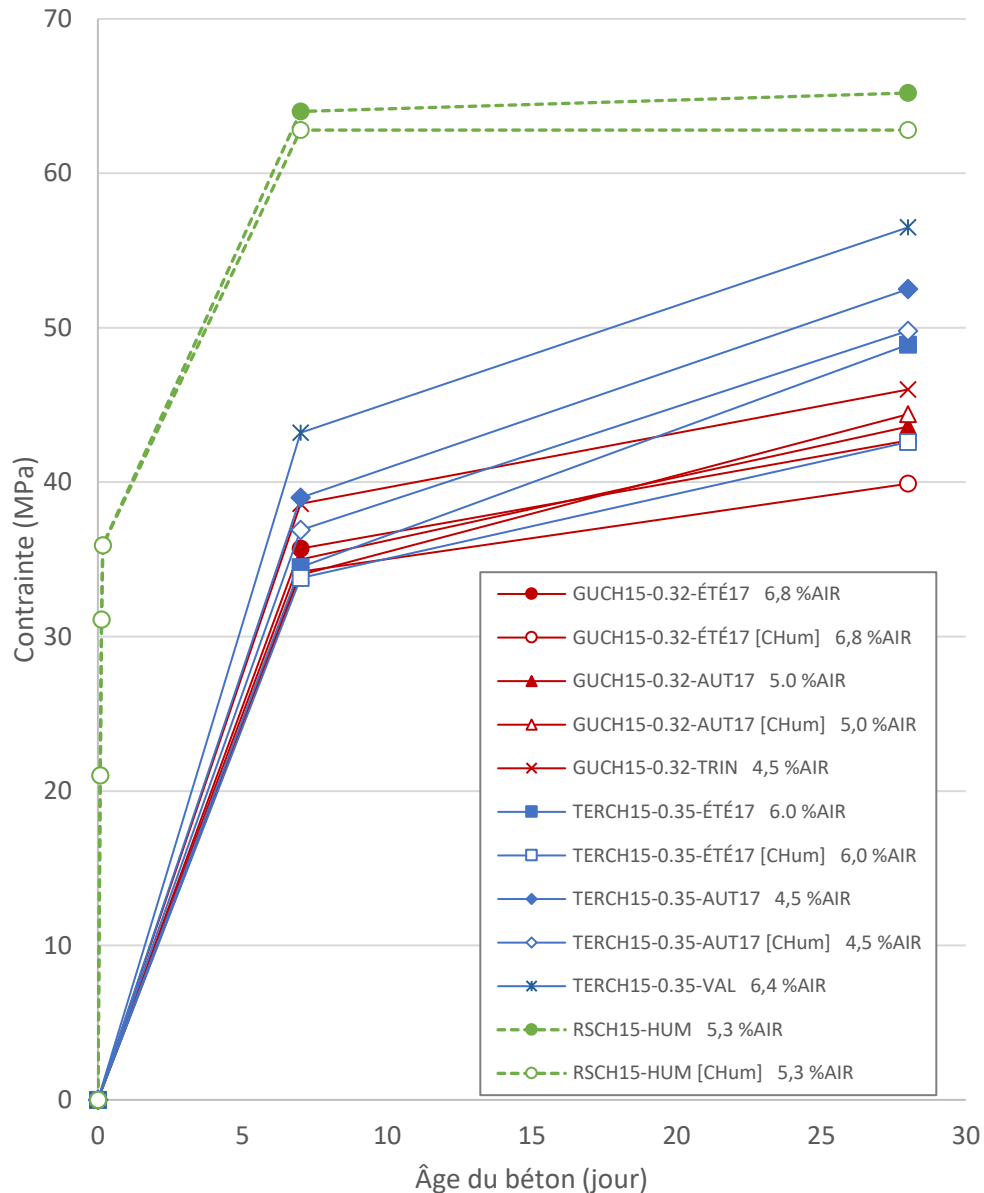


Figure 5-1 : Résistance à la compression des bétons de la phase 2

Phase 3 : Production de BML en conditions contrôlées

Sous-phase 3.2 : Étude du mûrissement humide

Les bétons produits dans la phase préliminaire 3.2 ont permis d'étudier l'effet du mûrissement en fonction de l'âge du béton. Les bétons fabriqués avec le liant GU ont obtenu une résistance supérieure aux 35 MPa exigés par la norme 3101 du MTQ. Les bétons ont une résistance à 28 jours de 46 MPa à 53 MPa pour des teneurs en air variant entre 4,5% et 7,6%. La formulation ayant une cure complète humide a été la moins performante. Celle ayant 7j humide suivis d'un

séchage est celle qui a le mieux performé (figure 5-2). La formulation GURF15-Y provient de la même gâchée de béton et montre la même tendance.

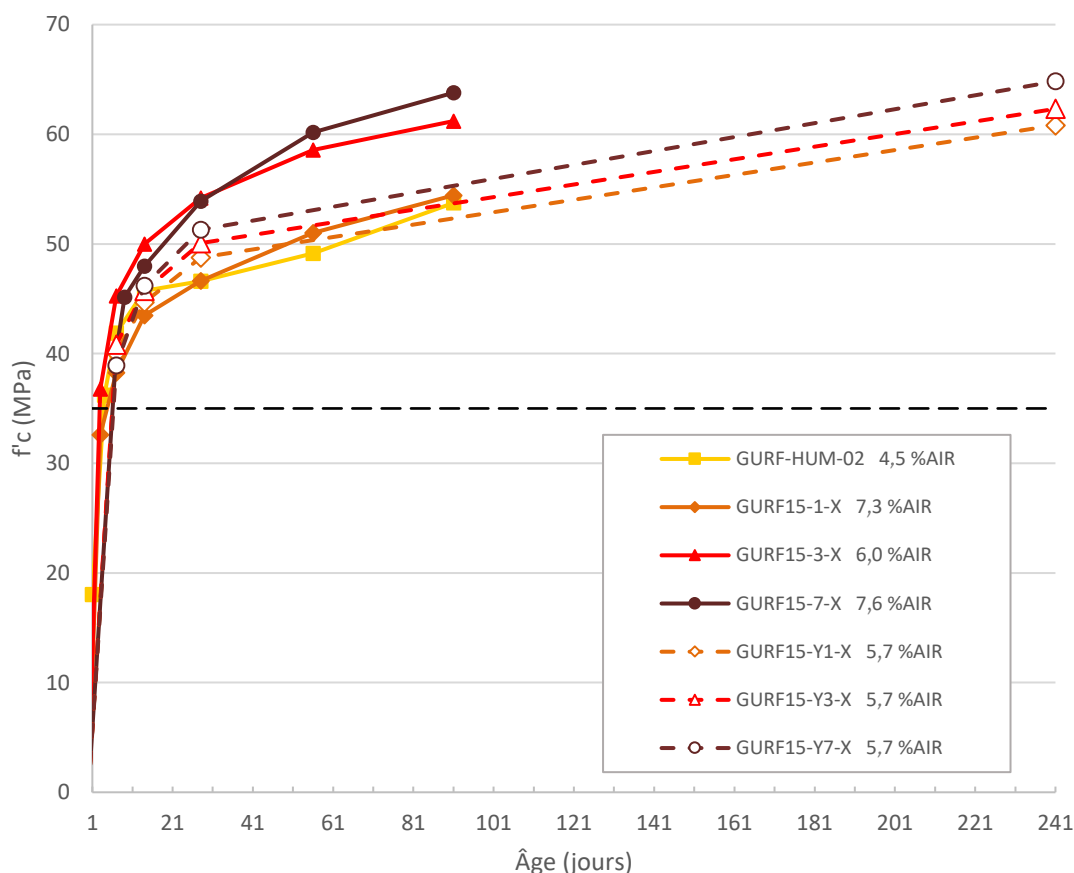


Figure 5-2 : Résistance à la compression des bétons GU de la phase préliminaire 3.2

Les courbes de la figure 5-2 montrent que la cure humide maintenue jusqu'à l'âge de l'essai donne les résistances les plus faibles (GURF-HUM-02). Une période de séchage après une courte cure humide de 1 à 7 jours augmente les résistances à la compression (GURF15-1-X, -3-X et -7-X). Les résultats entre GURF-HUM-02 et GURF15-1-X semblent similaires toutefois, il est important de prendre en considération la teneur en air pour l'interprétation des résultats. Pour la série GURF15-Y1, -Y3 et -Y7, on constate à nouveau l'influence favorable du prolongement de la cure humide à jeune âge, mais l'effet est moins marqué.

Les bétons fabriqués avec le liant ternaire ont obtenu une résistance supérieure à l'exigence de 35 MPa de la norme 3101 du MTQ. Les bétons ont une résistance à 28 jours de 49 MPa à 52

MPa pour des teneurs en air variant entre 4,5% et 7,6%. La formulation ayant 7j humide suivis d'un séchage est celle qui a le mieux performé (figure 5-3).

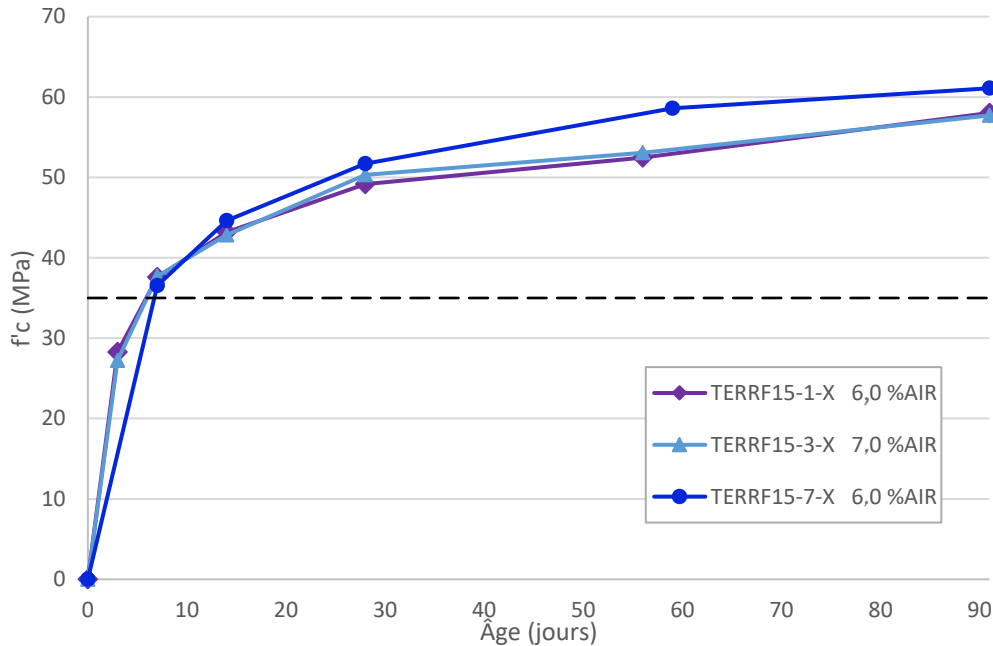


Figure 5-3 : Résistance à la compression de bétons ternaires de la phase préliminaire 3.2

Sous-phase 3.3 : Influence de l'entraînement d'air

Les bétons produits dans la phase 3.3 ont permis d'étudier l'effet du malaxage et de l'entraînement d'air. Les bétons fabriqués avec le liant GU ont obtenu une résistance supérieure à 35 MPa exigée par la norme 3101 du MTQ. Les bétons ont une résistance à 28 jours de 36 MPa à 50 MPa pour des teneurs en air variant entre 3,0% et 10,7%. Globalement, les bétons ayant les volumes d'air les plus faibles ont le mieux performé. Les bétons provenant de la bétonnière mobile ont des résistances supérieures malgré un rapport E/L plus élevé que les bétons de laboratoire avec E/L=0,30 (figure 5-4).

Le volume d'air a une grande influence sur les résistances à 28 jours. Globalement, pour un E/L donné, les résistances à la compression les plus faibles sont obtenues avec les volumes d'air les plus élevés ($\geq 8\%$) et les résistances les plus élevées ont été obtenues les volumes d'air les plus faibles ($< 6\%$).

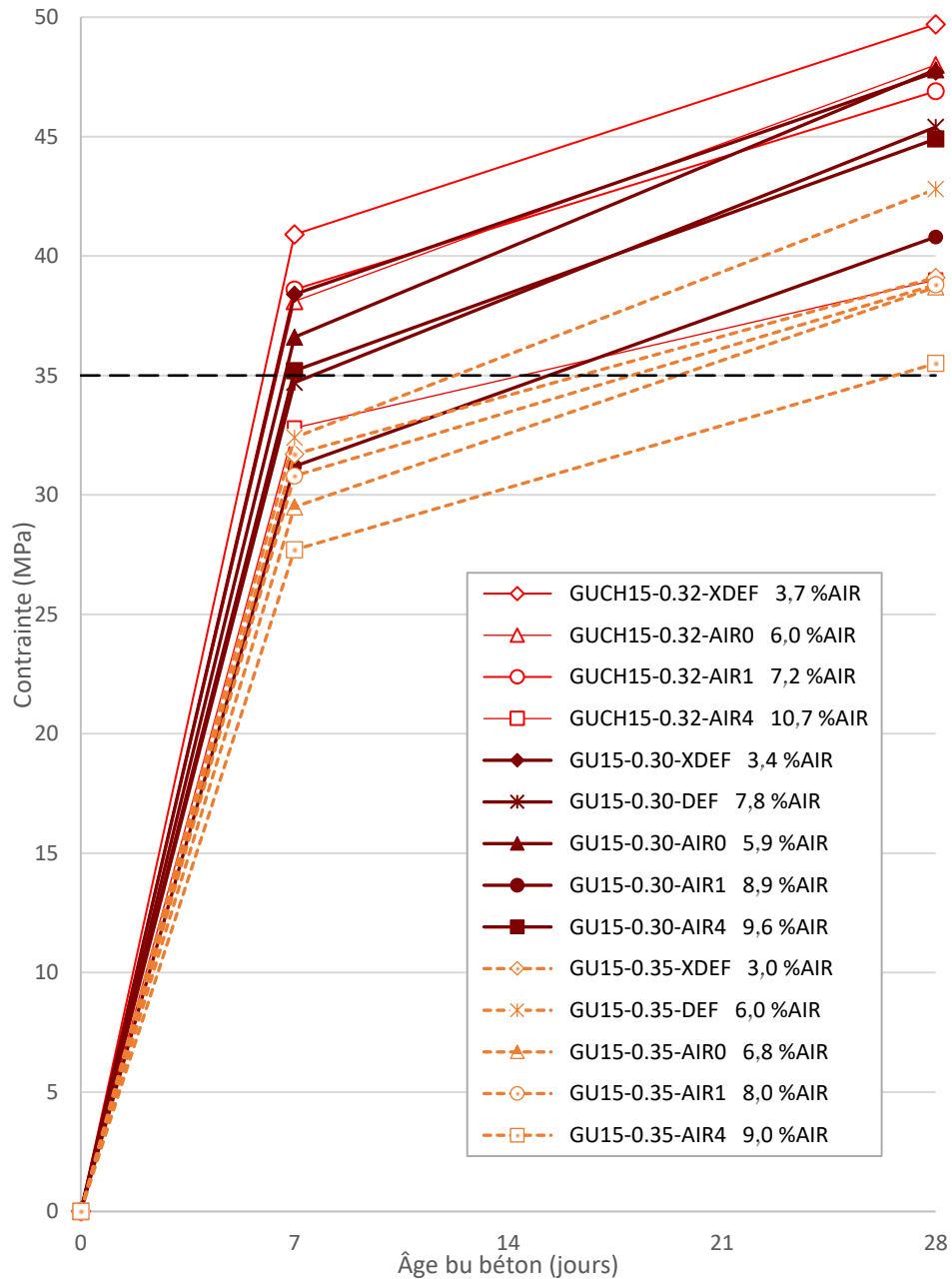


Figure 5-4 : Résistance en compression des bétons avec liant GU de la phase 3.3

Les bétons fabriqués avec le liant ternaire ont obtenu une résistance supérieure à 35 MPa exigée par la norme 3101 du MTQ. Les bétons ont une résistance à 28 jours de 40 MPa à 51 MPa pour des teneurs en air variant entre 2,9% et 10,3%. Globalement, les bétons ayant les volumes d'air les plus faibles ont le mieux performé. Les bétons provenant de la bétonnière mobile ont des résistances inférieures (figure 5-5).

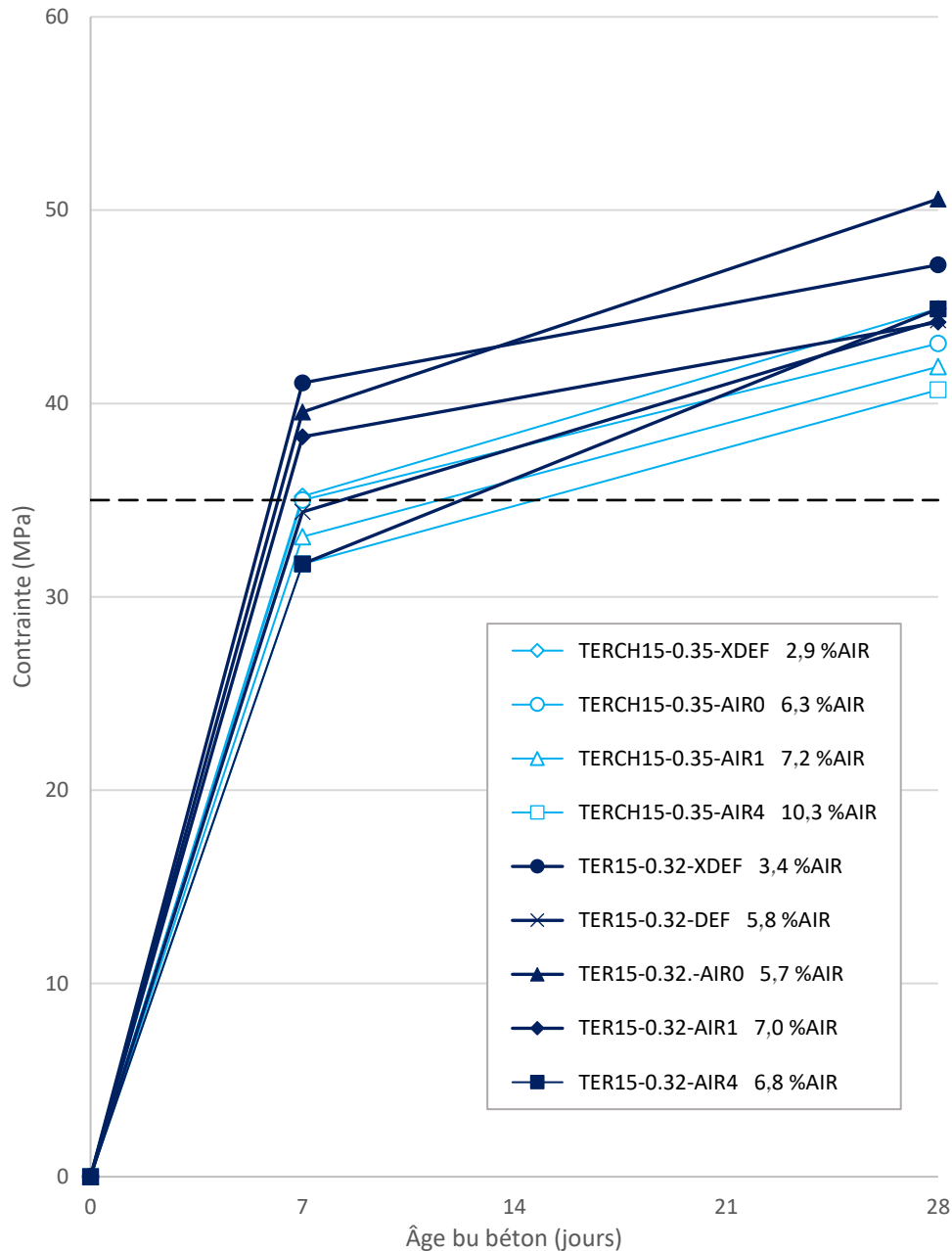


Figure 5-5 : Résistance en compression des bétons avec liant ternaire de la phase 3.3

Les résultats de l'essai de fendage ont pour but d'évaluer la qualité et la résistance du film de latex dans la comatrice latex-ciment. Les bétons ont une résistance à 28 jours de 4,2 MPa à 5,5 MPa pour des teneurs en air variant entre 2,9% et 10,7%. Pour fin de comparaison, la résistance au fendage d'un béton conventionnel pour être approximée par l'équation suivante : $f_{spt} = 0.56(f'_c)^{0.5}$ (ACI 318, 2015). La résistance à la compression moyenne pour les bétons de la figure 5-6 est de 43,8 MPa et donc la résistance au fendage estimée pour un béton conventionnel

ayant une même résistance à la compression est de 3,7 MPa. Globalement, il ne semble pas y avoir de corrélation entre la résistance au fendage et la teneur en air, ceci est dû à la variabilité générale des valeurs provenant de l'essai. (figure 5-6). Les valeurs estimées pour la résistance au fendage

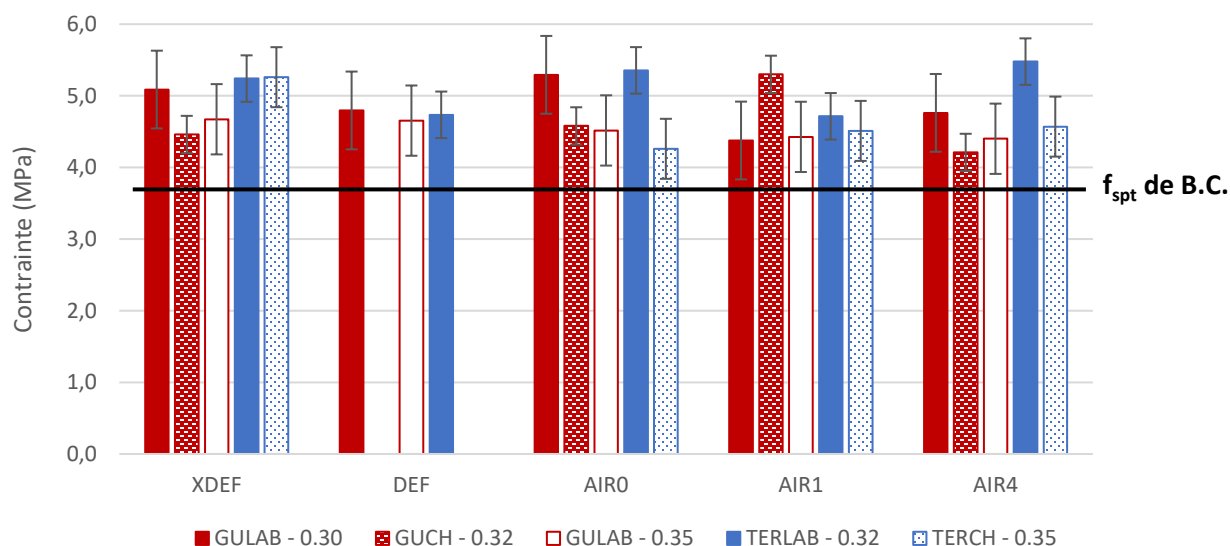


Figure 5-6 : Résistance au fendage des bétons de la phase 3.3

5.3. Caractérisation du réseau des bulles d'air

Phase 1 : Étude de la durabilité in situ

Le béton prélevé sur le pont de l'Île Verte est représentatif des BML fabriqués à l'époque. Sans utilisation d'AEA, le BML de l'Île Verte présente un volume d'air durci de 6,9% et un facteur d'espacement de 445 μm . La surface spécifique produite est de 9,9 mm^{-1} .

Phase 2 : Étude des BML produits en chantier

Les bétons prélevés dans le cadre de la phase 2 de l'étude ont été produits avec un dosage d'entraîneur d'air maximal de 100 mL / 100 kg de liant. Ainsi, les formulations obtenues ont un volume d'air entraîné variant de 3,5% à 6,8% pour des \bar{L} variant entre 340 μm et 509 μm . Les surfaces spécifiques produites varient entre 9,5 mm^{-1} et 15,3 mm^{-1} . Les figures 5-7 à 5-9 présentent les relations entre le dosage d'AEA et le volume d'air frais, le facteur d'espacement et la surface spécifique. Les mêmes figures présentent aussi, à gauche de l'axe vertical, les mêmes relations, mais avec le dosage d'ADA.

Phase 3 : Production de BML en conditions contrôlées

Les bétons prélevés dans le cadre de la phase 3 ont pour but d'évaluer la capacité d'entraînement des BML. Les figures 5-7 à 5-9 présentent la relation entre le dosage de l'AEA (ou ADA) et le volume d'air frais. Les figures regroupent les dosages d'AEA et d'ADA. Les valeurs négatives de dosage représentent les dosages d'ADA en mL par 10 kg de liant. Les valeurs positives représentent les dosages d'AEA en mL par 100 kg de liant. Les formulations ont été faites avec des ADA afin de représenter des réseaux de bulles d'air ayant les pires propriétés. Les autres bétons ont eu des dosages d'AEA variant entre 0 et 333 mL / 100 kg de liant. Les points pleins représentent les formulations de laboratoire. Ces figures seront analysées dans le chapitre 6. Les formulations obtenues ont un volume d'air entraîné variant de 2,9% à 10,7% pour des \bar{L} variant entre 146 μm et 676 μm . Les surfaces spécifiques produites varient entre 8,3 mm^{-1} et 28,3 mm^{-1} . Pour les bétons de laboratoire, une dose d'AEA a suffi à atteindre un plateau. À partir de 48 mL / 100 kg de ciment, le volume d'air, le facteur d'espacement et la surface spécifique ne varient plus beaucoup. On remarque une plage de valeur assez large pour les dosages entre 0 mL et 48 mL ce qui est caractéristique des BML. Ces valeurs varient entre 176 μm et 328 μm pour les BL et entre 252 μm et 509 μm pour les BBM. Après la dose de 48 mL d'AEA, le volume d'air frais augmente, toutefois il est important de noter qu'il n'y a aucun gain significatif sur les autres propriétés dans le cas du liant GU. Pour ce qui est du liant ternaire, il se produit le phénomène inverse. Le volume d'air frais n'augmente pas, mais on observe un gain sur \bar{L} et α . Afin d'obtenir des volumes d'air et des facteurs d'espacement semblables à ceux du mélangeur planétaire, le dosage d'AEA des BBM doit être supérieur à 100 mL.

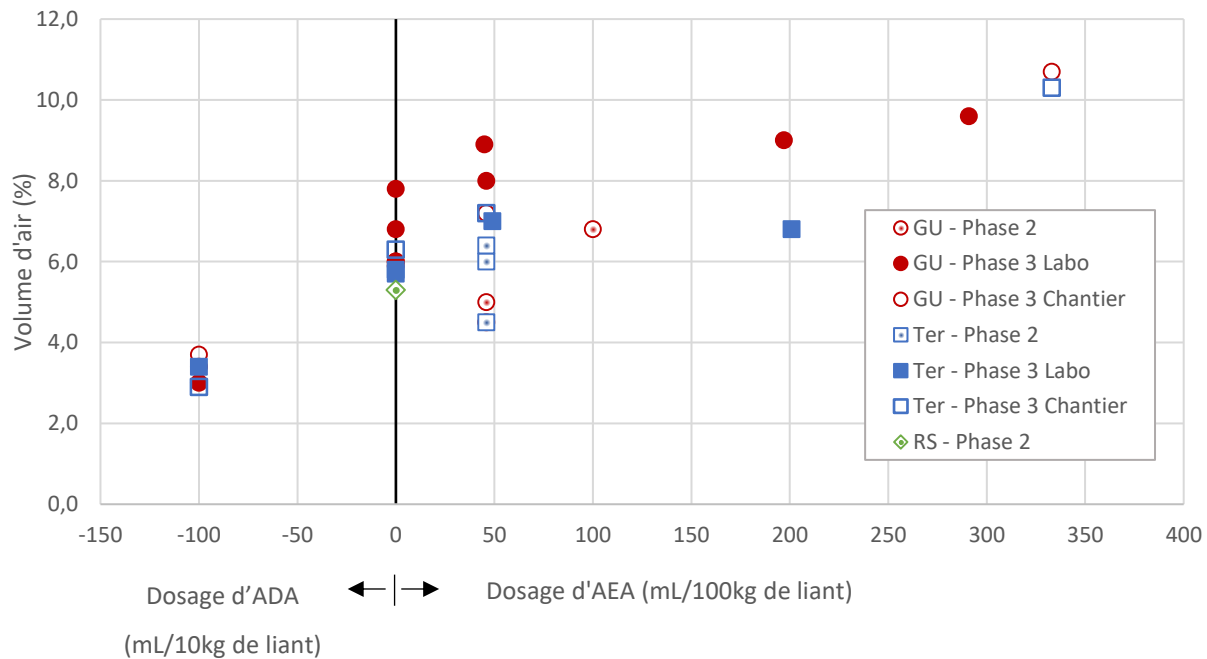


Figure 5-7 : Volume d'air frais des bétons de toutes les phases en fonction des dosages d'ADA/AEA

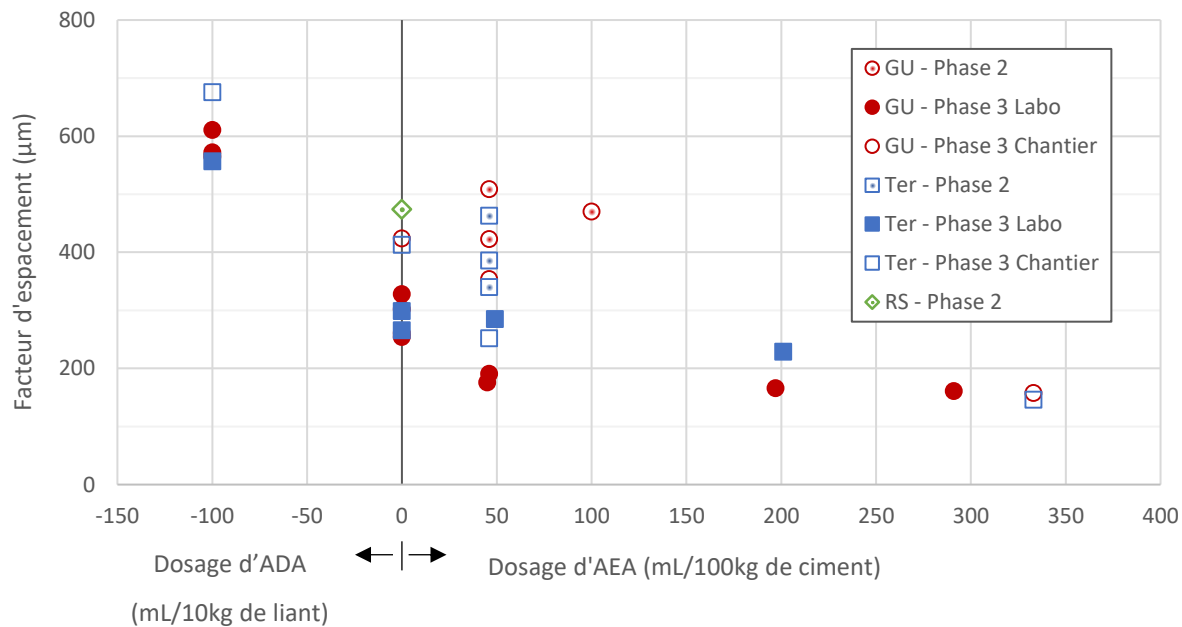


Figure 5-8 : Facteur d'espacement des bétons de toutes les phases en fonction des dosages d'ADA/AEA

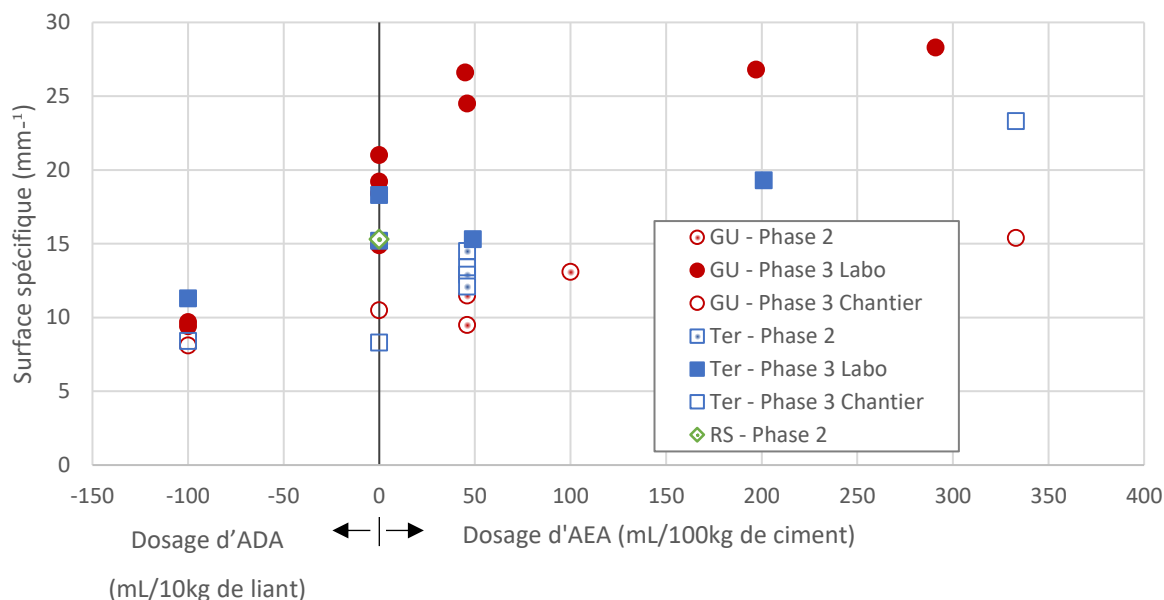


Figure 5-9 : Surface spécifique des bétons de toutes les phases en fonction des dosages d'ADA/AEA

5.4. Résistance à la fissuration interne

Cette section présente les résultats de gel-dégel pour les 3 phases de l'étude. Les résultats sont organisés sous forme de graphique présentant le facteur de durabilité, la variation de la masse et la déformation des éprouvettes. Les cycles ont été arrêtés après 300 cycles ou lorsque l'échantillon était totalement détruit. Selon les critères d'admissibilité du MTQ, un béton est considéré « non durable » lorsque le facteur de durabilité tombe sous 80%. Ce critère est présenté sur les figures comme repère visuel. Malgré les recommandations de la norme ASTM C666, les essais ont perduré après que le facteur de durabilité est tombé sous les 50%. Cela avait pour but d'observer la déformation jusqu'à la destruction des échantillons. Les photos des éprouvettes après l'essai sont présentées à l'annexe E.

Phase 1 : Étude de la durabilité in situ

Les prélèvements faits sur la dalle de l'Île verte ont permis d'établir le comportement à l'essai ASTM C666 pour la chape de BML et le substrat. Les essais ont été effectués sur des échantillons sciés dans la dalle. Les essais ont été démarrés avec des prismes. Les deux bétons sont considérés comme durables puisque le facteur de durabilité n'est pas descendu sous les 80%. Le BML, ayant un \bar{L} de 445 μm , se différencie du BC de par sa grande déformation, plus de 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Les données sont présentées dans les figures 5-10, 5-11 et 5-12.

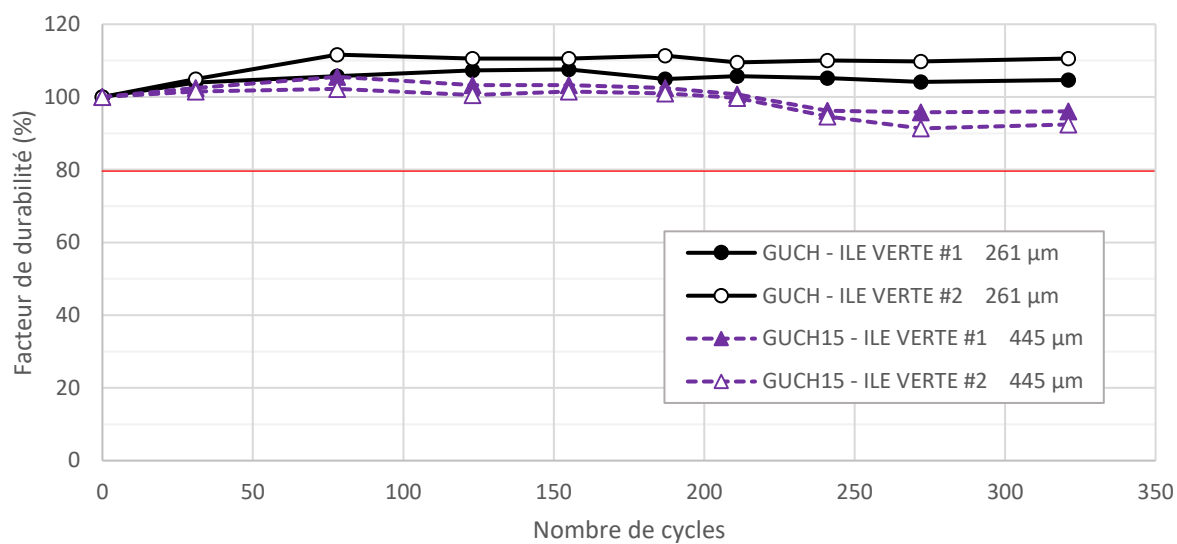


Figure 5-10 : Courbes du facteur de durabilité des bétons de la phase 1

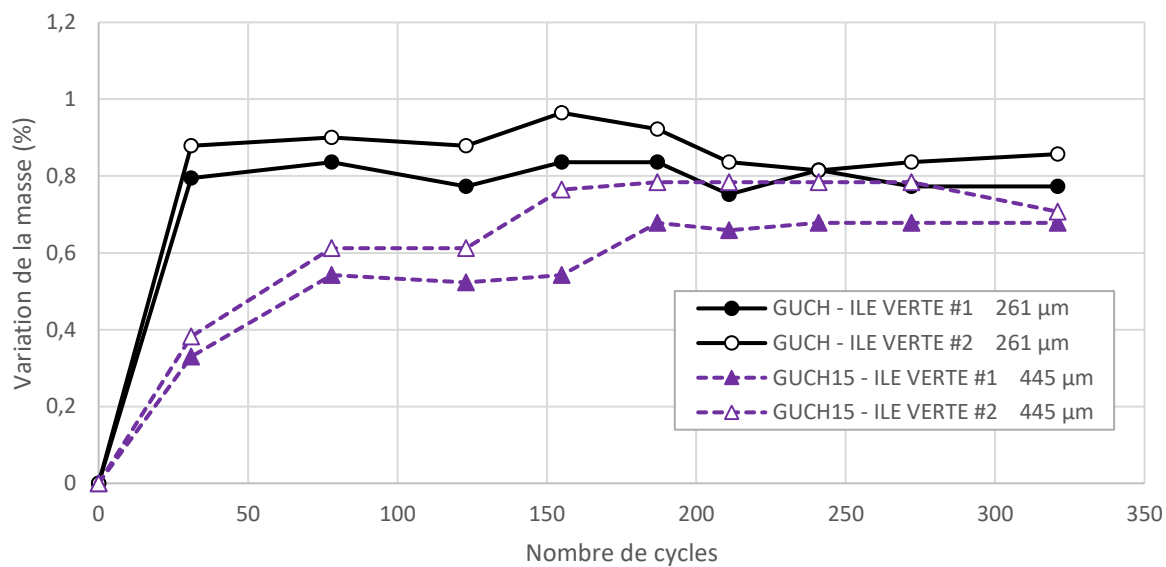


Figure 5-11 : Courbes de variation de la masse des bétons de la phase 1

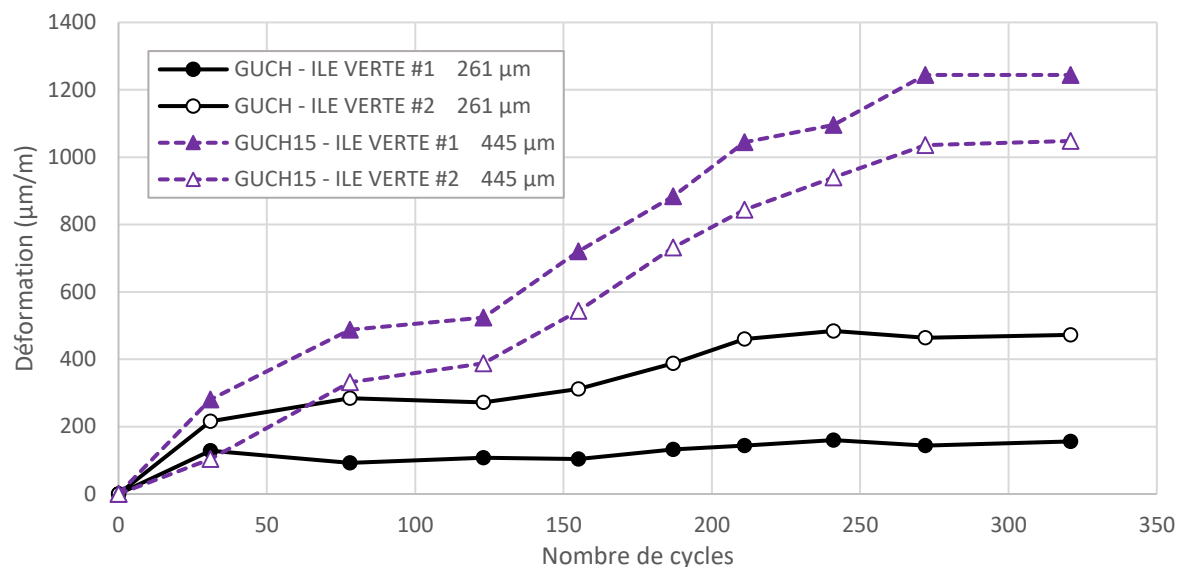


Figure 5-12 : Courbes des déformations des bétons de la phase 1

Phase 2 : Étude des BML produits en chantier

La phase 2 permet l'évaluation du comportement à l'essai ASTM C666 des BML fabriqué actuellement par les BM. L'échantillonnage comprend 5 formulations avec le liant GU, 5 formulations avec le liant ternaire et 1 formulation avec le liant RapidSet. Dans le but d'alléger les graphiques, les résultats présentés pour cette phase sont les moyennes des éprouvettes testées (figure 5-13, 5-14 et 5-15). Pour le liant GU, les bétons GUCH15-0.32-AUT17 cure humide et GURM15-0.32-F cure latex sont considérés non durables et ont été complètement détruits au cours de l'essai. Ceux-ci ont un \bar{L} respectif de 509 μm et 399 μm . Avant la rupture, les déformations respectives étaient de 3726 $\mu\text{m/m}$ et 2176 $\mu\text{m/m}$. Pour le liant ternaire, le béton TERCH15-0.35-AUT17 a subi uniquement la cure humide. Ce béton a un \bar{L} de 463 μm . Le béton n'a pas subi de destruction complète et sa déformation finale était de 1412 $\mu\text{m/m}$. L'analyse détaillée de ces résultats sera accomplie au chapitre 6.

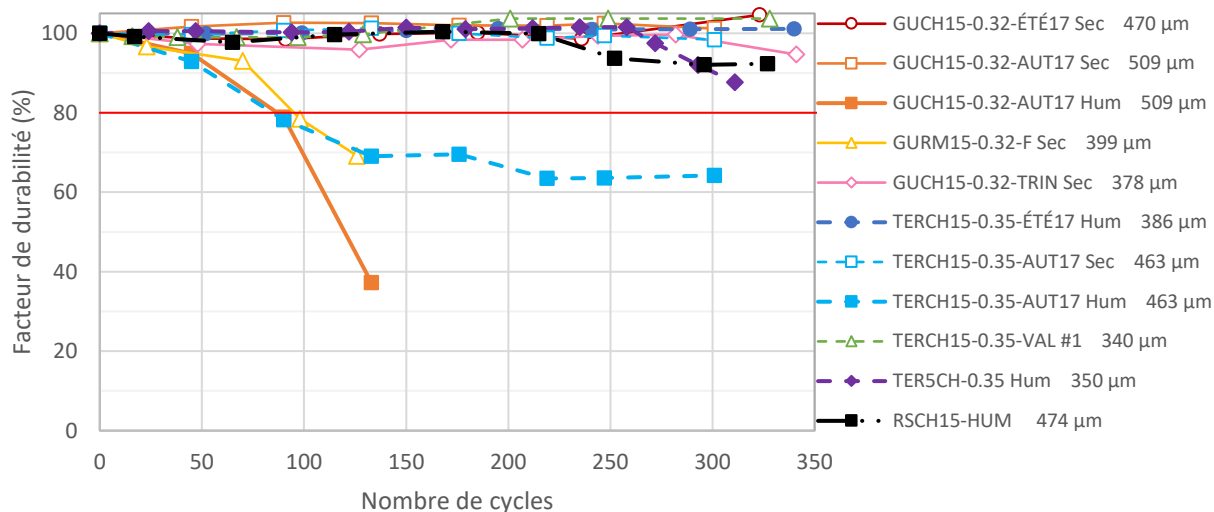


Figure 5-13 : Courbes du facteur de durabilité des bétons de la phase 2

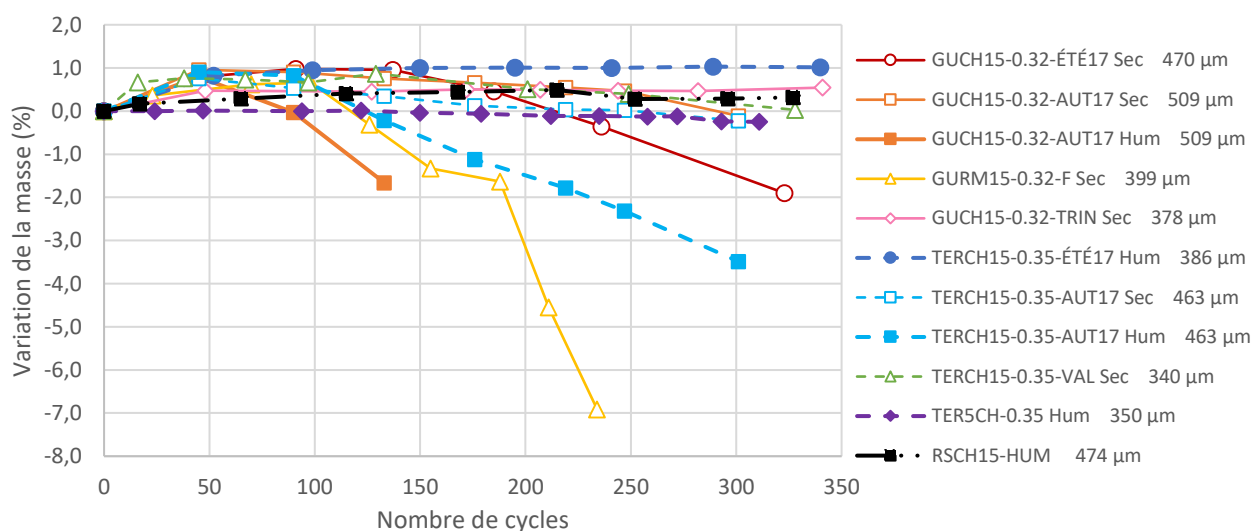


Figure 5-14 : Courbes de variation de la masse des bétons de la phase 2

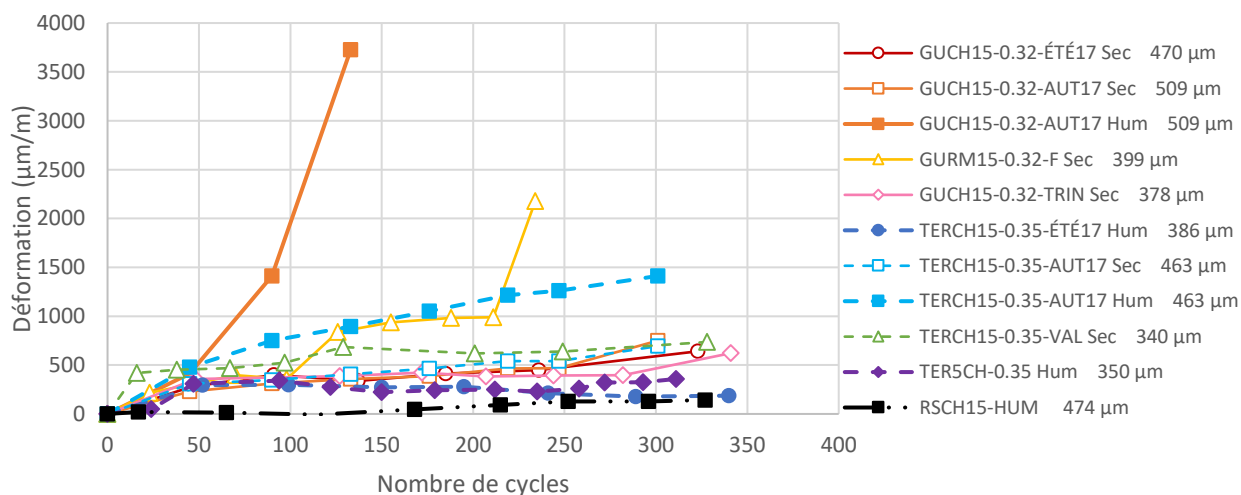


Figure 5-15 : Courbes des déformations des bétons de la phase 2

Phase 3 : Production de BML en conditions contrôlées

Phase 3 - Laboratoire

Dans le but d'alléger les graphiques de la phase 3 - laboratoire, les résultats présentés sont les moyennes des éprouvettes testées. Les bétons de la phase 3 en laboratoire comportent 15 bétons (5 bétons avec liant GU et rapport E/L = 0,30, 5 bétons avec liant GU et rapport E/L = 0,35 et 5 bétons avec liant ternaire et rapport E/L = 0,32). Tous les bétons de la série GU 0.30 (figure 5-16, 5-17 et 5-18) sont considérés durables. Par contre, le béton GU15-0.30-XDEF, ayant 611 μm de \bar{L} , s'est allongé plus fortement que les autres : 690 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour la cure latex et 512 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour la cure humide. L'analyse détaillée de ces résultats sera accomplie au chapitre 6.

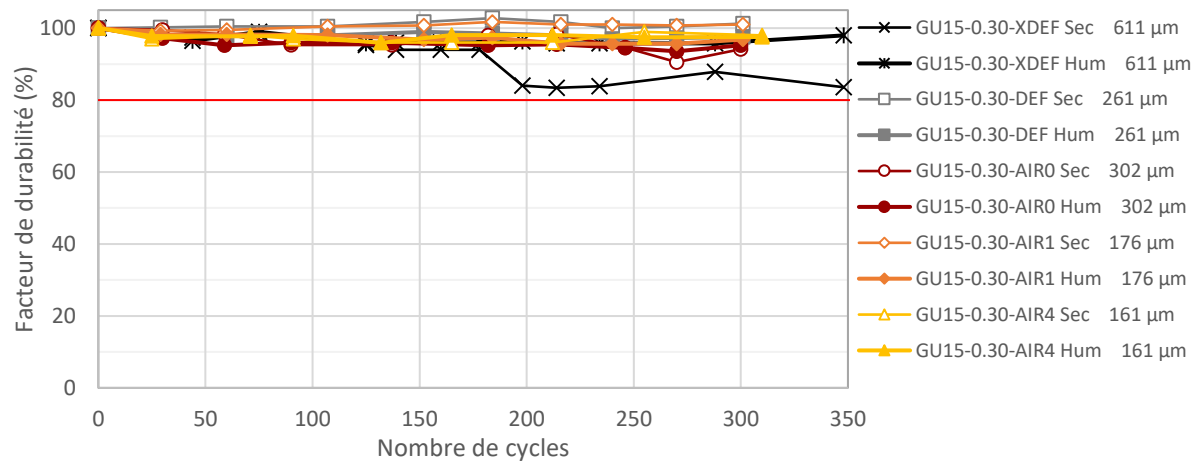


Figure 5-16 : Courbes du facteur de durabilité des bétons (0.30-GU) de la phase 3 - laboratoire

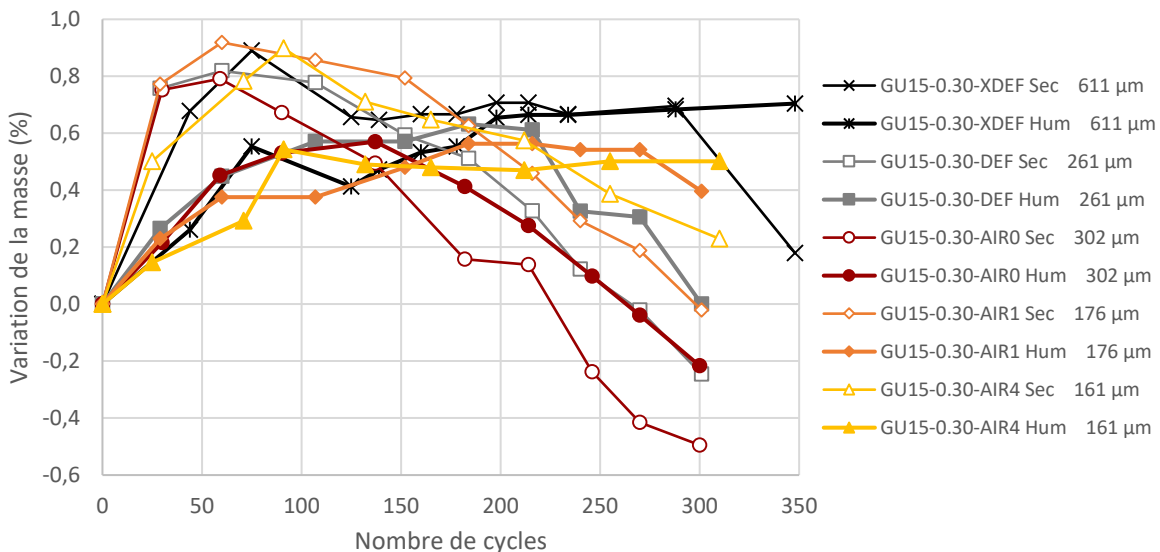


Figure 5-17 : Courbes de variation de la masse des bétons (0.30-GU) de la phase 3 - laboratoire

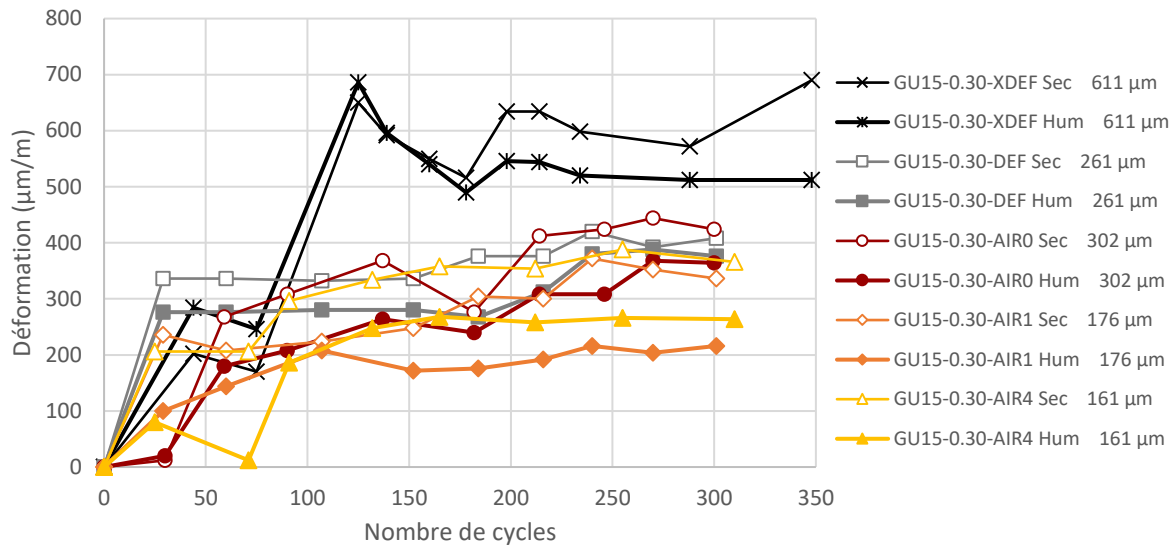


Figure 5-18 : Courbes des déformations des bétons (0.30-GU) de la phase 3 – laboratoire

Pour la série GU 0.35 (figure 5-19, 5-20 et 5-21), tous les bétons, sauf un, sont considérés durables selon le facteur de durabilité et ceci est dû à l'écaillage du prisme. L'ultrason ne pouvant pas passer dans l'échantillon présente un faux négatif. Ceci se confirme en se basant sur l'allongement du spécimen qui a très bien résisté sur 350 cycles (inférieur à 1000 $\mu\text{m/m}$). Donc, tous les bétons sont durables. Le béton GU15-0.35-XDEF cure latex, ayant un \bar{L} de 572 μm , a obtenu un facteur de durabilité de 0%. La déformation subie par cet échantillon est la plus élevée, soit 818 $\mu\text{m/m}$. Le même béton avec la cure humide de 7 jours est considéré durable et sa déformation est de 630 $\mu\text{m/m}$.

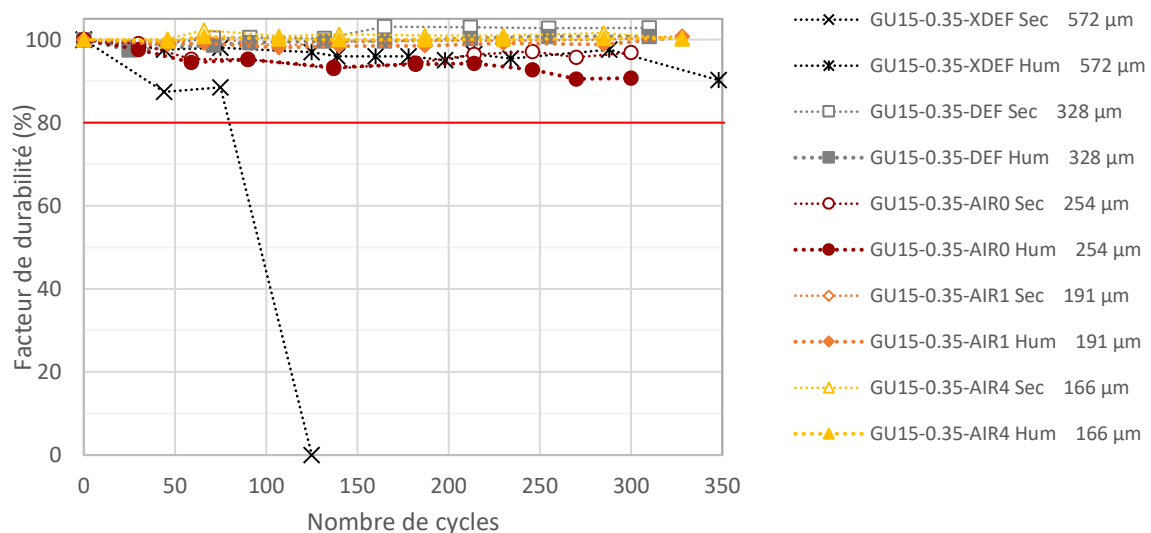


Figure 5-19 : Courbes du facteur de durabilité des bétons (0.35-GU) de la phase 3 - laboratoire

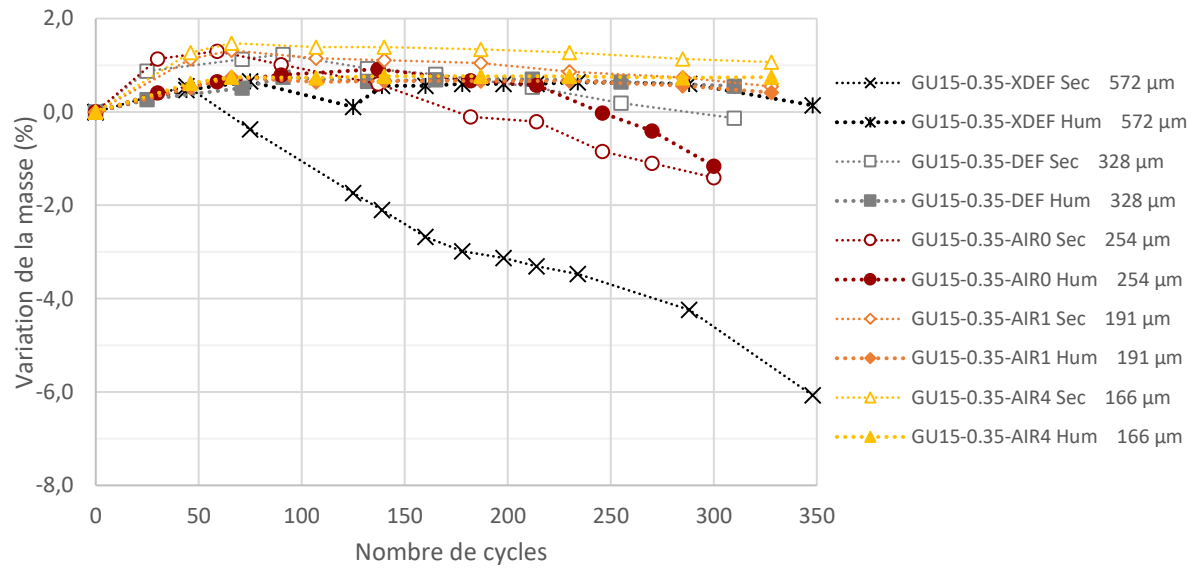


Figure 5-20 : Courbes de variation de la masse des bétons (0.35-GU) de la phase 3 - laboratoire

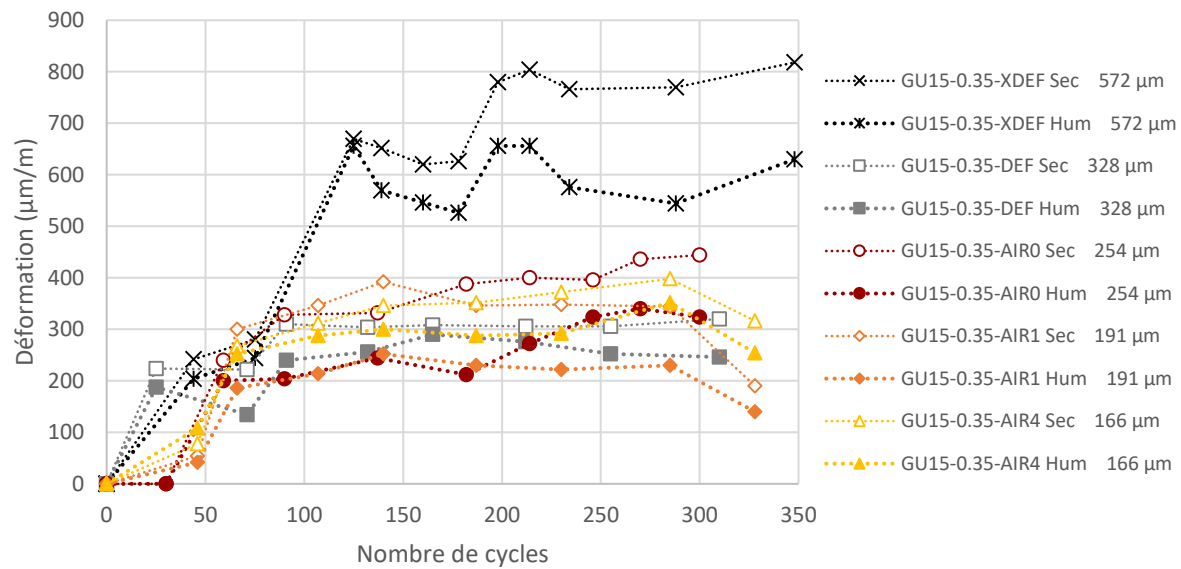


Figure 5-21 : Courbes des déformations des bétons (0.35-GU) de la phase 3 - laboratoire

Pour la série ternaire 0.32 (figure 5-22, 5-23 et 5-24), les bétons TER15-0.32-XDEF cure humide et latex, ayant un \bar{L} de 557 μm , sont considérés comme non durables. Toutes les autres formulations sont considérées comme durables. Le béton TER15-0.32-DEF est durable, car son facteur de durabilité à 300 cycles est supérieur à 80%. Les déformations de TER15-0.32-XDEF

cure latex était de 4546 $\mu\text{m}/\text{m}$ et cure humide était de 2018 $\mu\text{m}/\text{m}$. L'analyse détaillée de ces résultats sera accomplie au chapitre 6.

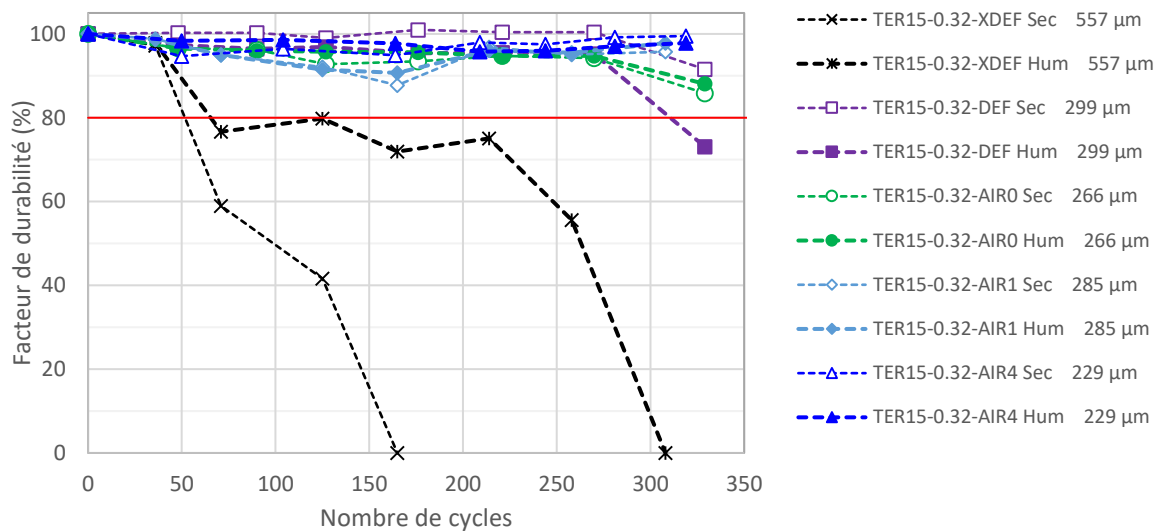


Figure 5-22 : Courbes du facteur de durabilité des bétons (0.32-Ternaire) de la phase 3 - laboratoire

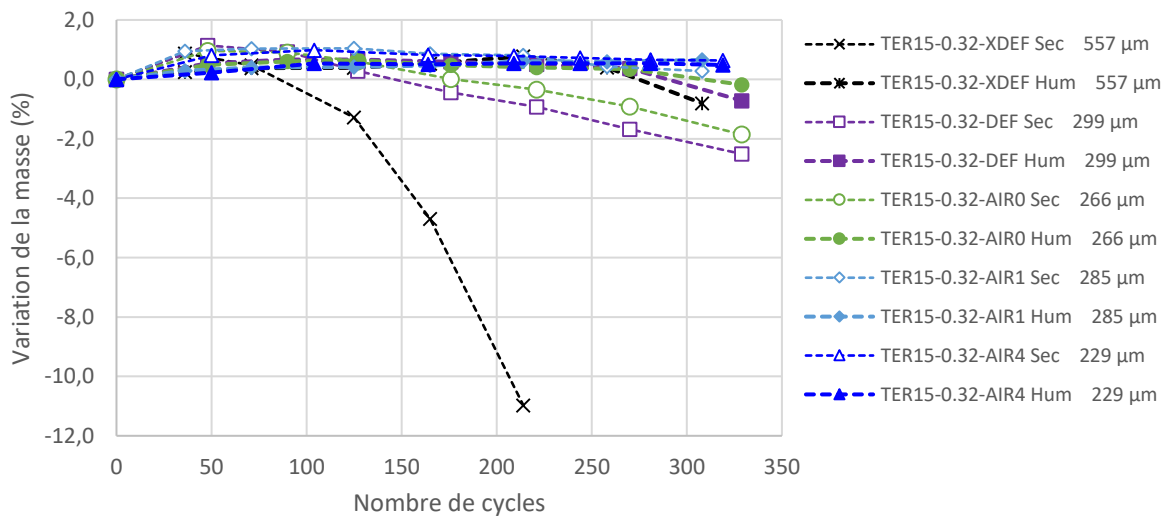


Figure 5-23 : Courbes de variation de la masse des bétons (0.32-Ternaire) de la phase 3 - laboratoire

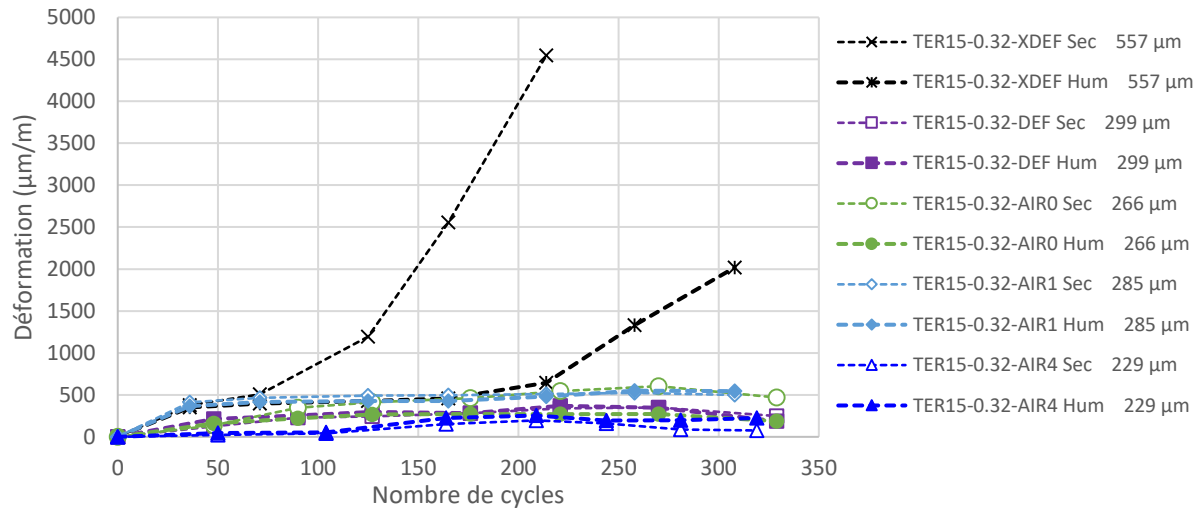


Figure 5-24 : Courbes des déformations des bétons (0.32-Ternaire) de la phase 3 - laboratoire

Phase 3 - Chantier

Les bétons de la phase 3 en chantier comportent 8 bétons (4 bétons avec liant GU et 4 bétons avec liant ternaire). Les graphiques de la phase 3 – chantier présentent les résultats des deux éprouvettes pour chaque formulation. Cela a été fait dans le but de tenir compte de la variabilité possible des BML de chantier. Pour le liant GU (figure 5-25, 5-26 et 5-27), les bétons avec un facteur d'espacement supérieur à 354 µm se sont fortement écaillés, cela s'explique par la forte perte de masse. En analysant les déformations, il est possible de conclure que seulement le béton avec ADA (565 µm) n'est pas durable. Les poutres GUCH15-AIR0 et AIR1 n'étaient pas rupturées après 300 cycles.

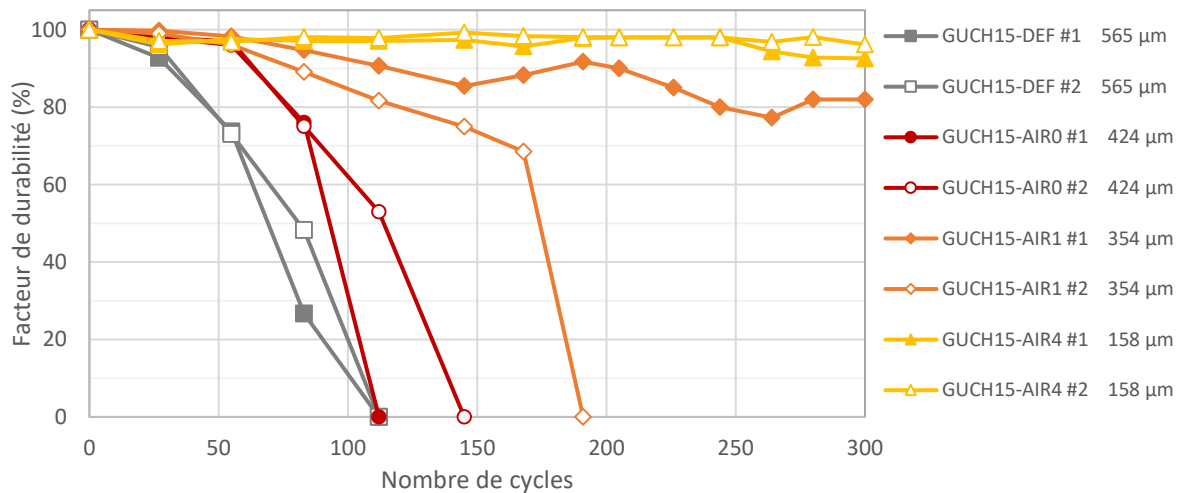


Figure 5-25 : Courbes du facteur de durabilité des bétons (GU) de la phase 3 – chantier

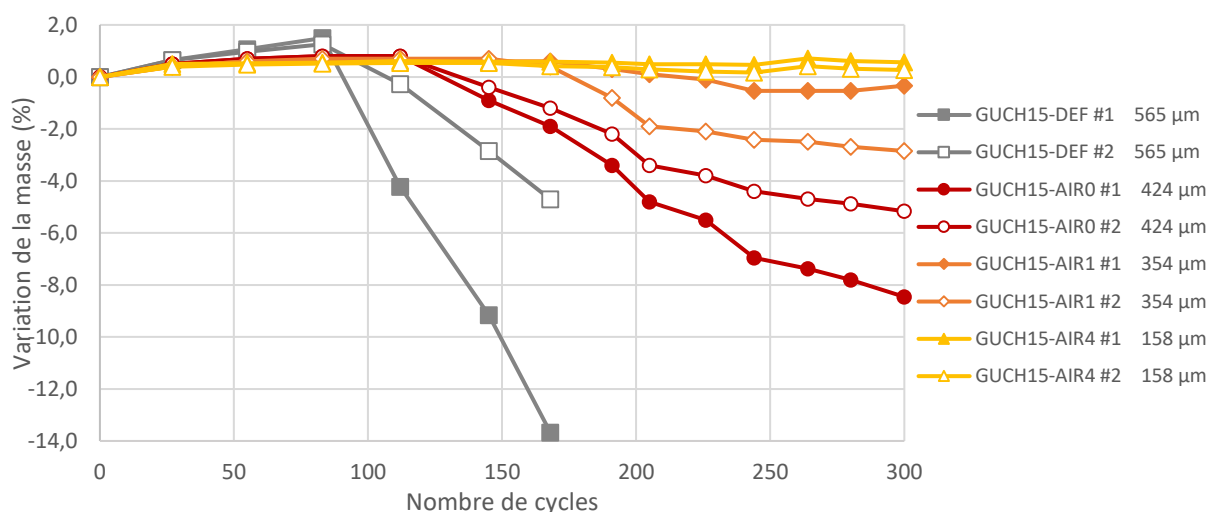


Figure 5-26 : Courbes de variation de la masse des bétons (GU) de la phase 3 - chantier

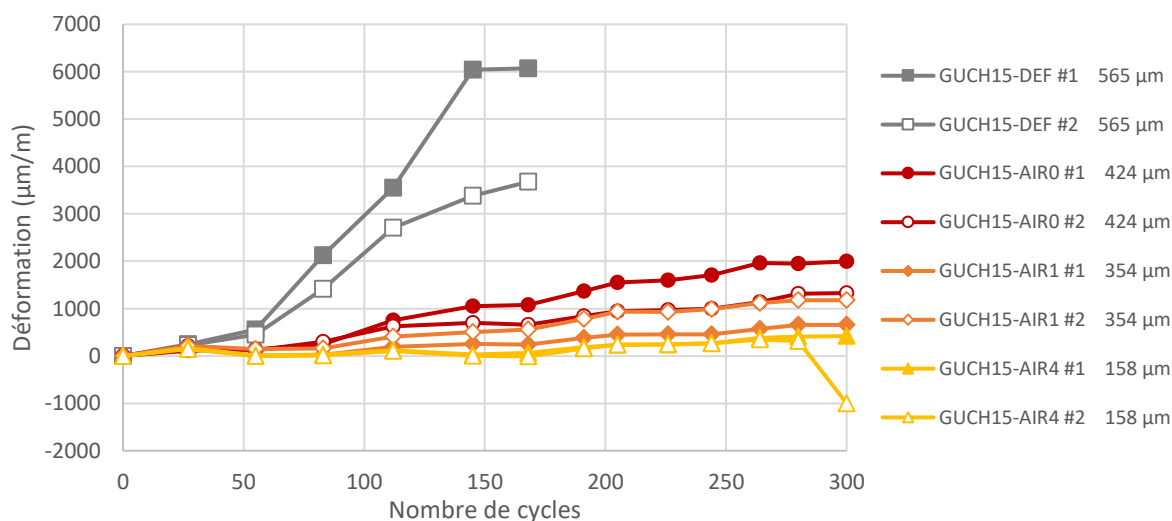


Figure 5-27 : Courbes des déformations des bétons (GU) de la phase 3 – chantier

Pour le liant ternaire (figure 5-28, 5-29 et 5-30), seulement les formulations avec un facteur d'espacement supérieur de 413 µm ne sont pas durables. Avec un \bar{L} élevé, la surface des prismes s'écaille très hâtivement. Le béton TERCH15-DEF n'est pas durable, car son facteur de durabilité atteint 0 en plus d'une déformation moyenne de 1490 µm/m. Le béton TERCH15-AIR0 est considéré durable en raison de la déformation sous la barre de 1000 µm/m, malgré un F.D. inférieur à 80%. Les deux autres bétons ont atteint la limite de 300 cycles en terminant avec un F.D. supérieur à 80%.

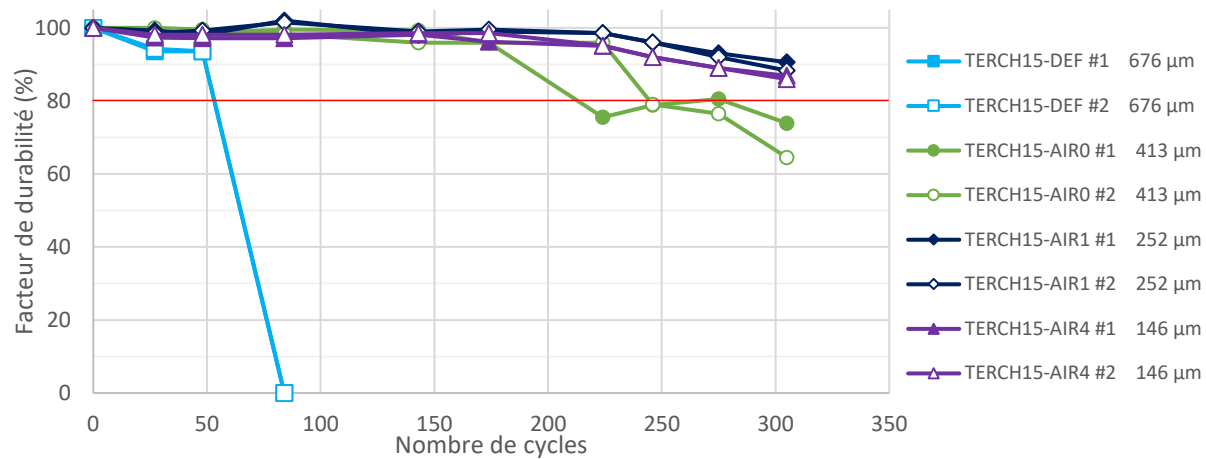


Figure 5-28 : Courbes du facteur de durabilité des bétons (ternaire) de la phase 3 – chantier

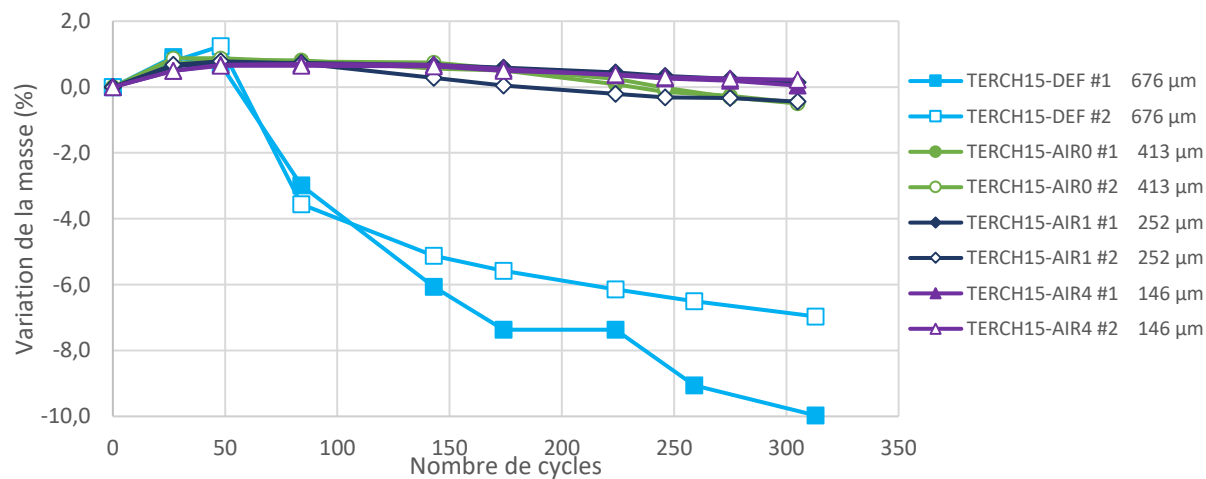


Figure 5-29 : Courbes de variation de la masse des bétons (ternaire) de la phase 3 - chantier

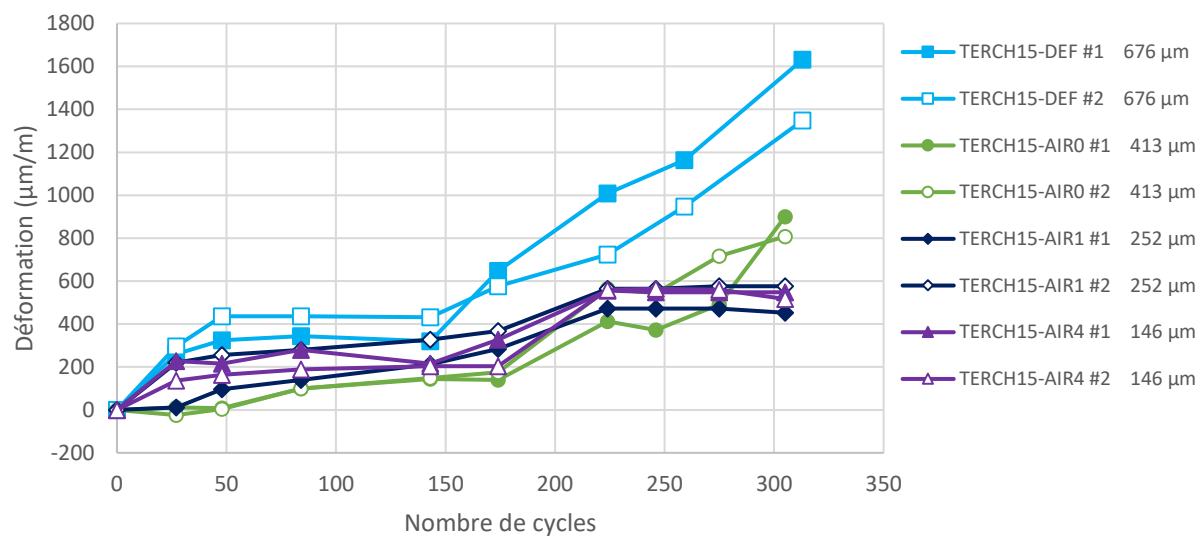


Figure 5-30 : Courbes des déformations des bétons (ternaire) de la phase 3 – chantier

5.5. Résistance à l'écaillage

Cette section présente, sous forme de tableau, les résultats des essais d'écaillage pour les bétons des trois phases de l'étude. Chaque tableau présente le facteur d'espacement, le volume d'air durci et la masse des débris pour chaque paire d'éprouvettes (A et B). Un béton est considéré « non durable » lorsque la masse de débris dépasse 500g/m². Ce critère est utilisé par le MTQ. Les photos des plaques après l'essai sont présentées à l'annexe F.

Phase 1 : Étude de la durabilité in situ

Les prélèvements faits sur la dalle de l'Île verte ont permis d'établir le comportement à l'essai BNQ 2621-905 pour la chape de BML. Les plaques ont été sciées à partir d'une dalle du tablier du pont. La surface testée correspond à la surface de roulement du pont. Le tableau 5-2 présente les masses de débris (g/m²) à la fin des 56 cycles de gel-dégel. Les courbes détaillées de la masse de débris en fonction du nombre de cycles sont présentées à l'annexe F. Les photos des éprouvettes suite à l'essai sont aussi présentées dans cette annexe.

Le BML GUCH15-ILE VERTE est considéré comme durable dû à la faible masse débris. De plus, l'écart entre les éprouvettes A et B est de 9 g/m² ce qui est très faible. L'écart présente l'indice de répétabilité de l'essai, cependant la norme BNQ 2621-905 ne comporte pas d'indication sur la précision à obtenir.

Tableau 5-2 : Résultats des essais d'écaillage des bétons de la phase 1

Béton	Facteur d'espacement	Volume d'air durci	Masse de débris		
			Plaque A	Plaque B	Moyenne
	μm	%	g/m^2	g/m^2	g/m^2
GUCH15-ILE VERTE	445	6.9	27	18	23

Phase 2 : Étude des BML produits en chantier

Le tableau 5-3 présente les résultats des essais de résistance à l'écaillage des bétons prélevés en chantier à la fin des 56 cycles de gel-dégel. Tous ces bétons ont un âge de 28 jours avant le début de la saturation. Deux types de cures ont été faits pour ces échantillons (C. Lat et C. Hyb). Les bétons de liant GU ont obtenu des masses de débris moyennes entre 27 à 363 g/m² peu importe le type de cure. Les bétons de liant ternaire ont obtenu des masses de débris moyennes variant

entre 56 et 1640 g/m². Les masses de débris pour les bétons de liant RapidSet varient entre 31 et 56 g/m². Les valeurs en rouge dans le tableau sont supérieures à la limite du MTQ de 500 g/m².

L'écart moyen entre les plaques donne un indice de répétabilité de l'essai. Un écart faible permet de mieux démarquer les performances globales des bétons. Les écarts globaux pour les liants GU, ternaire et RapidSet sont de respectivement 76, 91 et 3 g/m². Pour les bétons ayant subi les deux cures, l'écart moyen augmente lorsque la cure humide est utilisée. Pour la cure latex, l'écart moyen est 501g/m² alors que pour la cure hybride l'écart moyen est de 114 g/m². Cette augmentation de la variabilité sera prise en compte pour l'analyse au prochain chapitre.

Tableau 5-3 : Résultats des essais d'écaillage des bétons de la phase 2

Béton	Type de cure	Facteur d'espacement μm	Volume d'air durci %	Masse de débris		
				Plaque A g/m^2	Plaque B g/m^2	Moyenne g/m^2
GUCH15-0.32-ÉTÉ17	CLat	470	3.9	39	95	67
	CHyb			35	19	27
GUCH15-0.32-AUT17	CLat	509	4	76	102	89
	CHyb			300	143	222
GURM15-0.32-F	CLat	399	4.6	233	326	280
	CHyb			606	120	363
GUCH15-0.32-TRIN	CLat	378	4.4	312	151	232
TERCH15-0.35-ÉTÉ17	CLat	386	5	627	660	644
	CHyb			54	58	56
TERCH15-0.35-AUT17	CLat	463	4	1673	1607	1640
	CHyb			597	1078	838
TERCH15-0.35-VAL	CLat	340	5.5	119	382	251
RSCH15-AUT17	CLat	474	3	35	27	31
	CHyb			54	58	56

*Les valeurs en rouge sont supérieures à la limite de 500g/m².

Phase 3 : Production de BML en conditions contrôlées

Les tableau 5-4 et tableau 5-5 présentent les résultats des essais de résistance à l'écaillage obtenu en laboratoire pour les liants GU et ternaire. Tous ces bétons ont un âge de 28 jours avant le début de la saturation. Deux types de cures ont été faits pour ces échantillons (C. Lat et C. Hyb). Les bétons de liant GU ont obtenu des masses de débris moyennes entre 8 à 2213 g/m² peu importe le type de cure. Les bétons de liant ternaire ont obtenu des masses de débris variant

entre 70 et 748 g/m². Les valeurs en rouge dans le tableau sont supérieures à la limite du MTQ de 500 g/m². Les écarts globaux pour les liants GU et ternaire sont de respectivement 120 et 76 g/m². La cure humide augmente les écarts moyens pour les deux liants. Les écarts moyens du liant GU pour la cure latex sont de 36 g/m² et pour la cure hybride, l'écart est de 204 g/m². Dans le cas du liant ternaire, l'écart pour la cure latex est de 58 g/m² et de 95 g/m² pour la cure hybride.

Tableau 5-4 : Résultats des essais d'écaillage des bétons de laboratoire – liant GU de la phase 3

Béton	Type de cure	Facteur d'espacement <i>μm</i>	Volume d'air durci %	Masse de débris		
				Plaque A <i>g/m²</i>	Plaque B <i>g/m²</i>	Moyenne <i>g/m²</i>
GU15-0.30-XDEF	CLat	611	2.8	22	30	26
	CHyb			33	51	42
GU15-0.30-DEF	CLat	261	5.5	197	-	197
	CHyb			803	-	803
GU15-0.30-AIRO	CLat	302	3.5	159	-	159
	CHyb			204	-	204
GU15-0.30-AIR1	CLat	176	5.7	167	-	167
	CHyb			8	-	8
GU15-0.30-AIR4	CLat	161	6.1	202	182	192
	CHyb			571	136	354
GU15-0.35-XDEF	CLat	572	2.5	149	448	299
	CHyb			1879	2546	2213
GU15-0.35-DEF	CLat	328	5.2	111	45	78
	CHyb			53	1240	647
GU15-0.35-AIRO	CLat	254	4.3	89	-	89
	CHyb			17	-	17
GU15-0.35-AIR1	CLat	191	5.8	135	117	126
	CHyb			27	164	96
GU15-0.35-AIR4	CLat	166	6.7	70	47	59
	CHyb			6	10	8

*Les valeurs en rouge sont supérieures à la limite de 500g/m².

Tableau 5-5 : Résultats des essais d'écaillage des bétons de laboratoire – liant ternaire de la phase 3

Béton	Type de cure	Facteur d'espacement	Volume d'air durci	Masse de débris		
				Plaque A	Plaque B	Moyenne
		μm	%	g/m^2	g/m^2	g/m^2
TER15-0.32-XDEF	CLat	557	2.3	198	318	258
	CHyb			242	94	168
TER15-0.32-DEF	CLat	299	4.88	287	192	240
	CHyb			54	86	70
TER15-0.32.-AIRO	CLat	266	3.6	347	602	475
	CHyb			182	81	132
TER15-0.32-AIR1	CLat	285	5.8	698	798	748
	CHyb			230	787	509
TER15-0.32-AIR4	CLat	229	5.6	263	256	260
	CHyb			199	92	146

*Les valeurs en rouge sont supérieures à la limite de 500g/m².

Le tableau 5-6 présente les résultats des essais de résistance à l'écaillage obtenus en chantier pour les liants GU et ternaire. Tous ces bétons ont un âge de 28 jours avant le début de la saturation. Un type de cure a été fait pour ces échantillons (C. Lat). Les bétons de liant GU ont obtenu des masses de débris moyennes entre 33 à 101 g/m² peu importe le type de cure. Les bétons de liant ternaire ont obtenu des masses de débris variant entre 6 et 91 g/m². Aucun des bétons produits en bétonnière mobile n'a dépassé la valeur limite de 500 g/m².

Tableau 5-6 : Résultats des essais d'écaillage des bétons de chantier de la phase 3

Béton	Type de cure	Facteur d'espacement	Volume d'air durci	Masse de débris		
				Plaque A	Plaque B	Moyenne
		μm	%	g/m^2	g/m^2	g/m^2
GUCH15-0.32-XDEF	CLat	565	3.3	35	47	41
GUCH15-0.32-AIRO	CLat	424	4.3	95	107	101
GUCH15-0.32-AIR1	CLat	354	4.5	47	19	33
GUCH15-0.32-AIR4	CLat	158	8.3	76	66	71
TERCH15-0.35-XDEF	CLat	676	2.6	4	8	6
TERCH15-0.35-AIRO	CLat	413	5.2	12	22	17
TERCH15-0.35-AIR1	CLat	252	5.7	10	17	14
TERCH15-0.35-AIR4	CLat	146	7.3	75	106	91

5.6. Perméabilité aux ions chlorure

Phase 1 : Étude de la durabilité in situ

Les prélèvements faits sur la dalle de l'Île verte ont permis d'établir les propriétés de perméabilité aux ions chlorure pour la chape de BML et le substrat. Les essais ont été effectués sur des carottes de 95 mm prélevés dans la dalle. La charge totale suite à l'essai est de 16 coulombs pour le BML et de 7220 coulombs pour le substrat. Les résultats montrent bien la diminution des perméabilités occasionnée par les BML avec le temps.

Phase 2 : Étude des BML produits en chantier

La figure 5-31 présente les résultats des essais de perméabilité aux ions chlorure pour les bétons prélevés en chantier. Toutes les données recueillies à 56 jours sont sous la limite des 1 500 coulombs, par contre le liant ternaire produit des résultats faibles dès 28 jours. Dans le cas du liant GU, les résultats à 28 jours sont au-dessous des 1 500 coulombs à l'exception des bétons GURM15 et GU15-TRIN. Les données des bétons ÉTÉ 17 et AUT 17 serviront de référence, car ils représentent la production habituelle des BML.

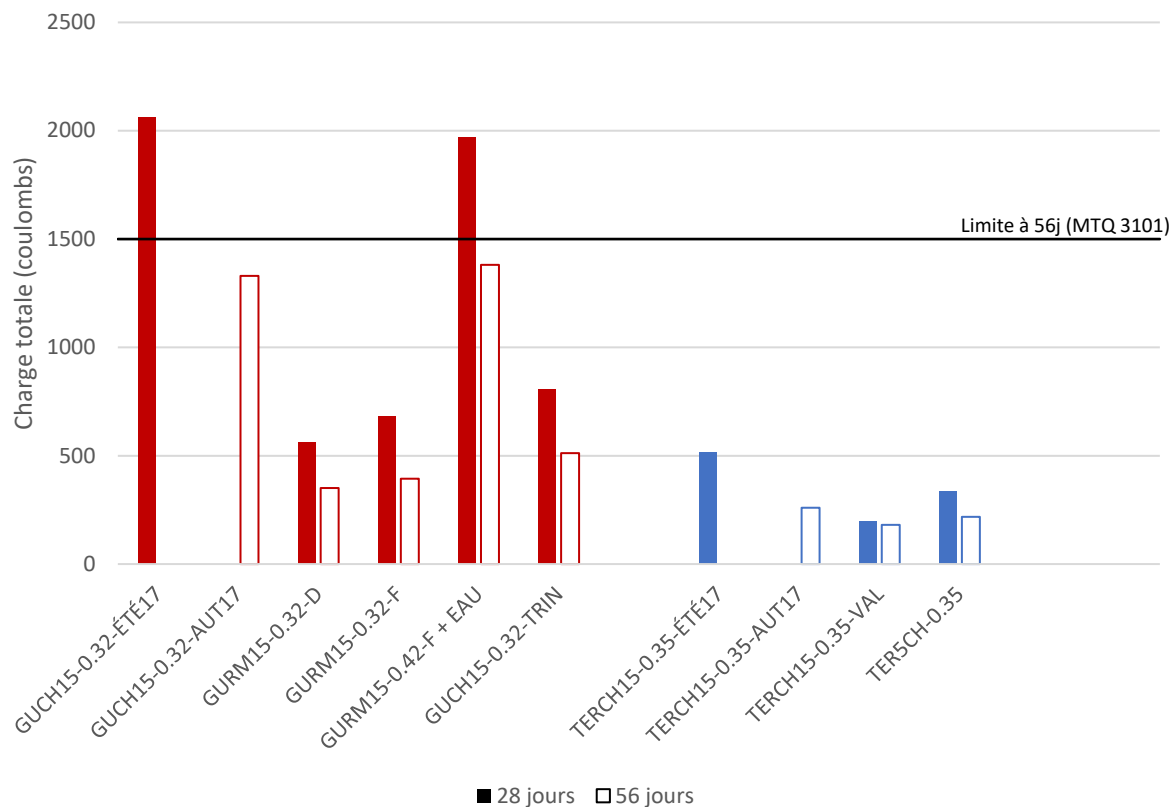


Figure 5-31 : Résultats des essais de KCL de la phase 3.2

Phase 3 : Production de BML en conditions contrôlées

Phase préliminaire 3.2 : Étude du mûrissement humide

Cette phase préliminaire a permis de comprendre l'évolution de la perméabilité des BML dans le temps (figure 5-32). Dans le cas du liant GU, le prolongement de la cure humide semble avoir un effet positif à jeune âge. Par la suite, cet effet s'estompe par la coalescence du film de latex dans la matrice cimentaire. Cela a pour effet de produire des résultats semblables à 56 jours peu importe la cure humide initiale. Tout comme mentionnées par la théorie, les valeurs continuent de diminuer par la suite. Dans le cas du liant ternaire, le prolongement du mûrissement humide ne semble avoir aucun effet sur les perméabilités aux ions chlorure. Il est aussi possible d'observer l'apparition d'un plateau à 28 jours.

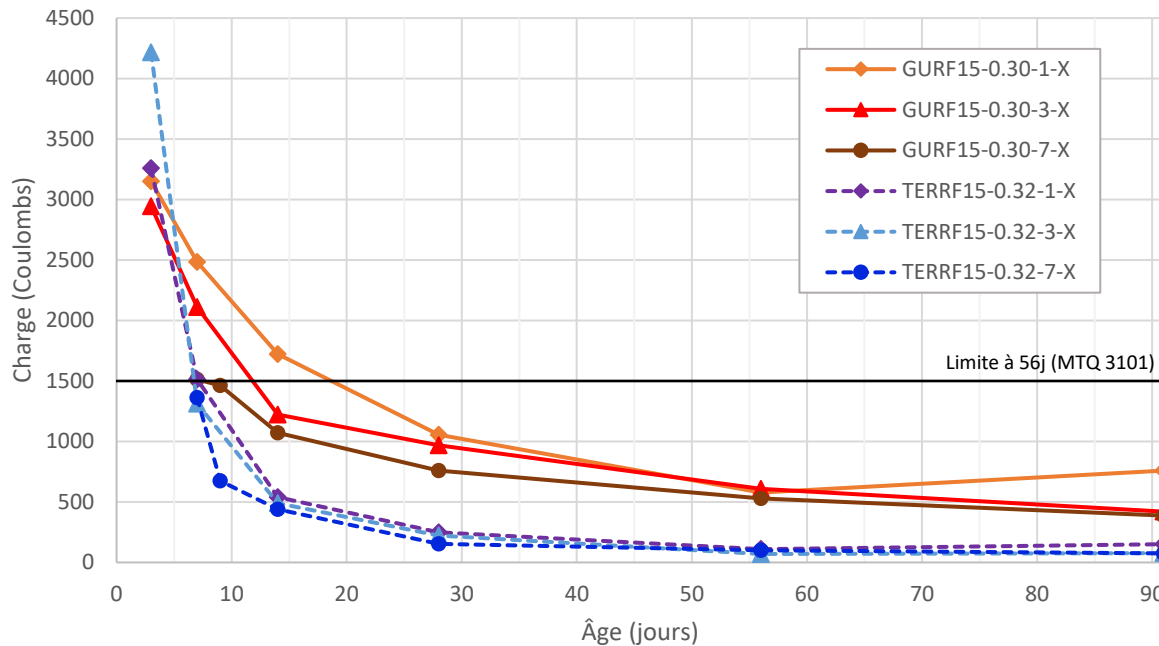


Figure 5-32 : Résultats des essais de KCL de la phase préliminaire 3.2

Afin de mieux quantifier l'influence de la cure humide pour le liant GU, une autre gâchée a été faite pour laquelle les échantillons de ce béton ont subi les trois cures. La figure 5-33 présente les données obtenues suite au prolongement de la cure humide pour l'essai de perméabilité aux ions chlorure. Les barres d'erreur de précision sont présentées dans cette figure afin d'établir plus précisément l'influence de la cure humide. La portion gauche de la figure représente trois bétons de gâchées différentes mais de même formulation ayant subi chacun une cure différente et la portion de droite représente une même gâchée de béton ayant subi les trois cures humides. La portion de gauche permet de conclure que le murissement humide n'a plus d'influence après 56 jours. La portion de droite nous permet de quantifier l'influence de la cure humide à jeune âge (14 jours et 28 jours). À 56j, les résultats sont généralement sous les 650 coulombs.

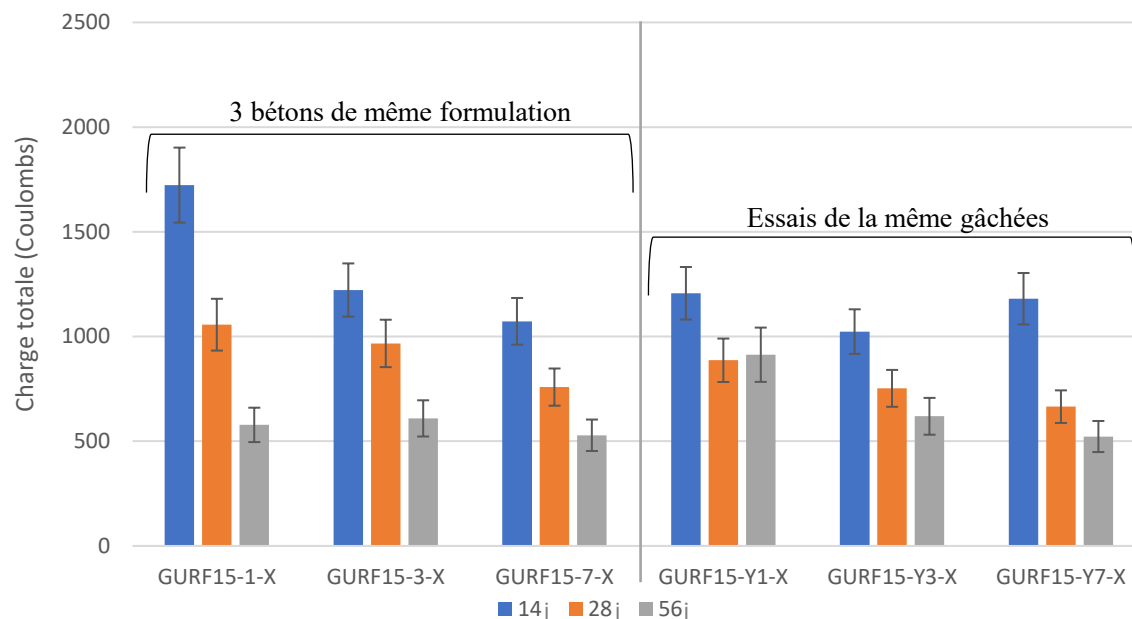


Figure 5-33 : Variation de la cure humide pour la formulation avec liant GU

Les gâchées en laboratoire et en chantier ont permis de produire des données pour des bétons ayant une variation du rapport E/L, du volume d'air entraîné ainsi que du type de malaxage (figure 5-34 et 5-35). Les données sont présentées en deux groupes (28j et 56j). Chacun de ses groupes contient deux séries d'échantillons soit les bétons produits en laboratoire et les bétons produits en bétonnière mobile. Elles sont présentées selon leur rapport E/L et placé entre ordres croissants de volume d'air entraîné. Pour le liant GU, on observe que les BML avec un rapport E/L inférieur ou égal à 0,32 respectent la norme 3101 du MTQ. Les formulations avec un rapport E/L de 0,35 ne rencontrent pas le critère de performance. Lors des essais, quatre formulations ont obtenu des résultats inattendus, celles-ci ont été reprises à un âge de 280 jours. Ces données sont présentées dans le tableau 5-7. Pour le liant ternaire, les résultats sont tous sous le maximum prescrit par le ministère. La charge maximale obtenue est de 685 coulombs. Les bétons provenant de la bétonnière mobile semblent avoir eu une meilleure performance que ceux fabriqués en laboratoire.

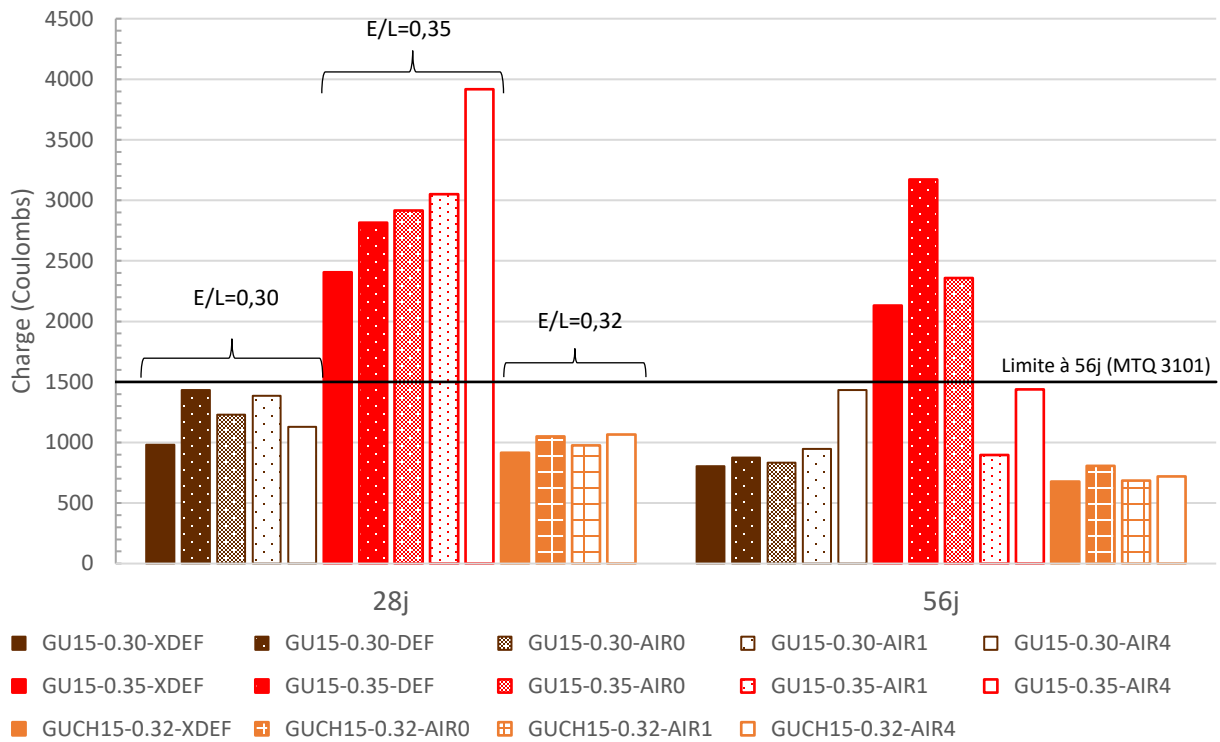


Figure 5-34 : Résultats des essais de KCL de la phase 3 - liant GU

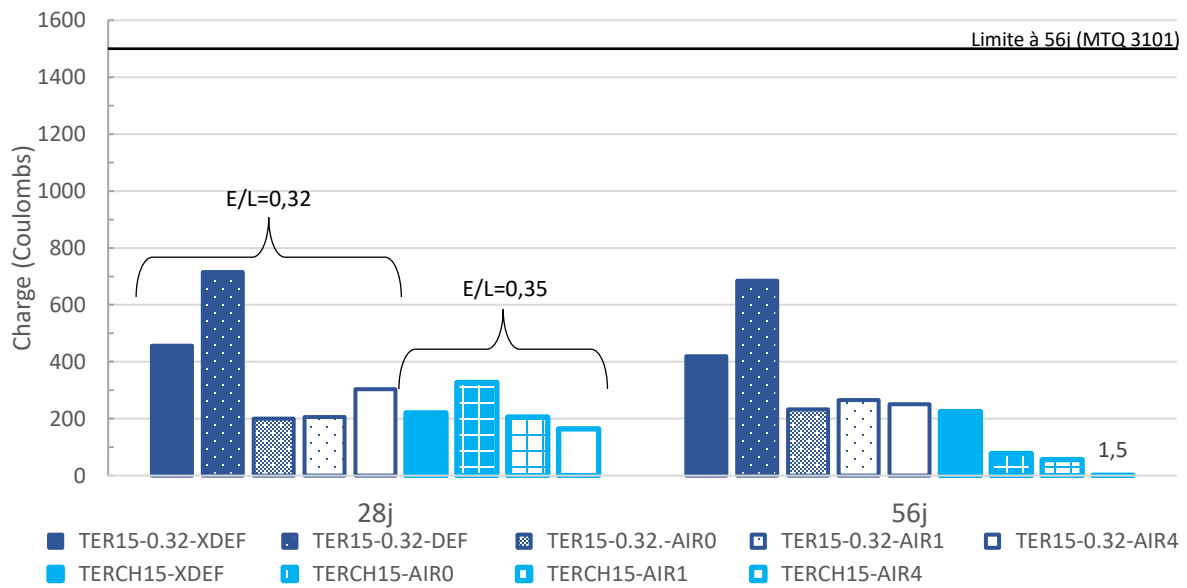


Figure 5-35 : Résultats des essais de KCL de la phase 3 - liant ternaire

Tableau 5-7 : Données à 280 jours des bétons

	28 jours	56 jours	280 jours	Raison
GU15-0.30-AIR4	1129	1433	402	L'essai se déroulé conformément, mais les résultats à 56j sont supérieurs à ceux de 28 jours.
GU15-0.35-DEF	2816	3173	1229	
GU15-0.35-AIR1	3050	897	1313	L'instrumentation a fait défaut lors l'essai.
GU15-0.35-AIR4	3917	1438	1156	

5.7. Vides perméables

Phase 1 : Étude de la durabilité in situ

Les prélèvements faits sur la dalle de l'Île verte ont permis d'établir les propriétés d'absorption et de vides perméables pour la chape de BML et le substrat. L'absorption pour la chape de BML est de 2,96% alors que pour le substrat la valeur est de 6,86%. Pour ce qui est des vides perméables, la valeur pour la chape de BML est de 6,68% alors que pour le substrat la valeur est de 15,46%. On constate l'effet du film de latex qui permet de réduire l'absorption ainsi que le volume de vides perméables.

Phase 2 : Étude des BML produits en chantier

La phase 2 de l'étude permet d'évaluer l'absorption et le volume de vides perméables des BML prélevés en chantier. Les résultats produits sont très semblables, malgré les volumes d'air entraîné différents et le changement de liant. Les données d'absorption produites varient entre 2,47% et 3,62% et celles-ci de vides perméables varient entre 5,53% et 8,05%. La figure 5-36 présente les valeurs mentionnées précédemment pour les trois liants (GU, ternaire et RapidSet).

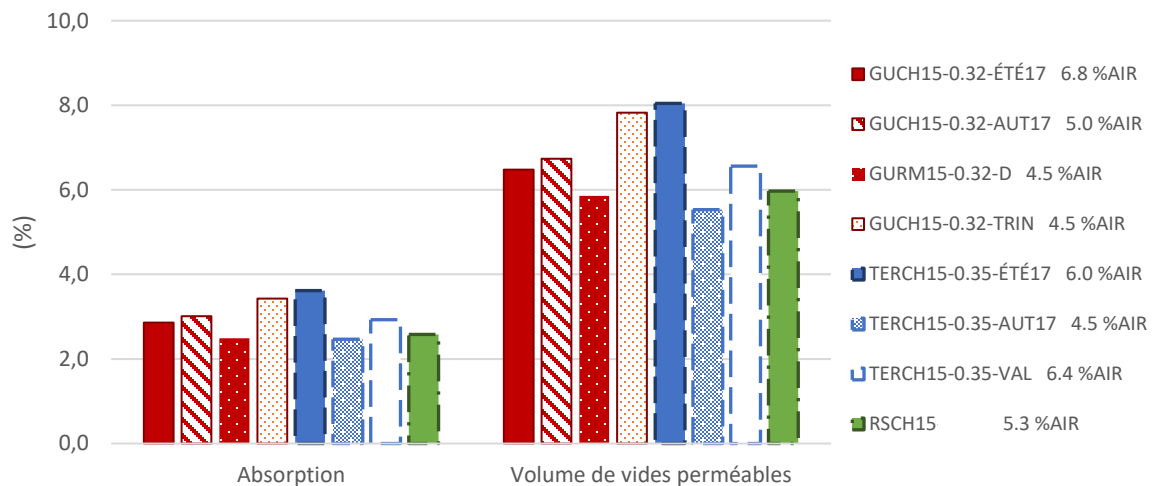


Figure 5-36 : Résultats d'absorption et de vides perméables de la phase 2

Phase 3 : Production de BML en conditions contrôlées

Sous-phase 3.2 : Étude du mûrissement humide

Les bétons produits dans la phase préliminaire 3.2 ont permis d'étudier l'effet du mûrissement en fonction de l'âge du béton et l'évolution de l'absorption et du volume de vides en fonction du temps. Les figures 5-37 et 5-38 ne permettent pas d'établir une corrélation nette entre les nombreuses variables et les résultats à l'essai ASTM C642. Tous liants confondus, l'absorption des bétons varie entre 1,14% et 2,62% et le volume de vides perméables varie entre 2,61% et 5,97%.

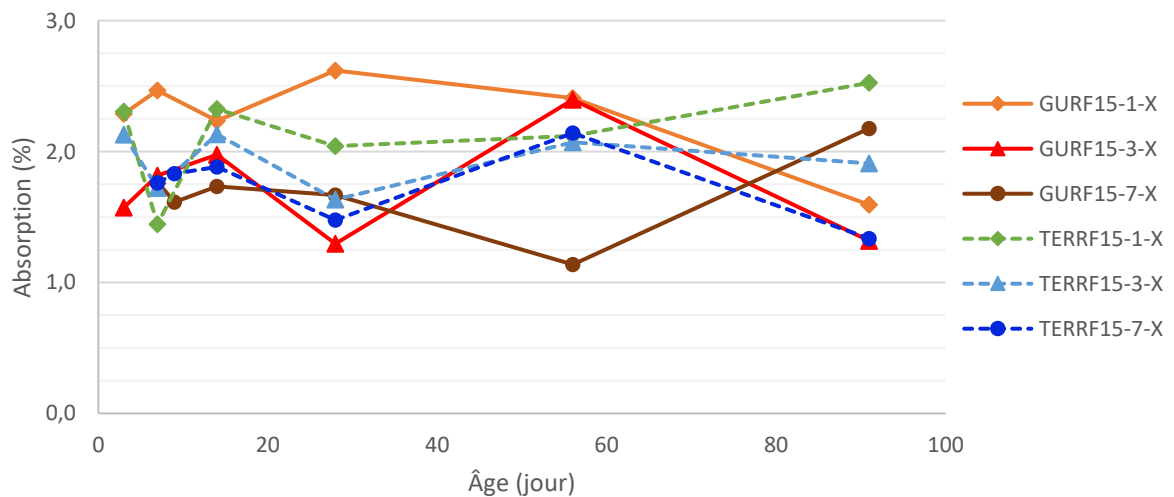


Figure 5-37 : Absorption des bétons de la phase préliminaire 3.2

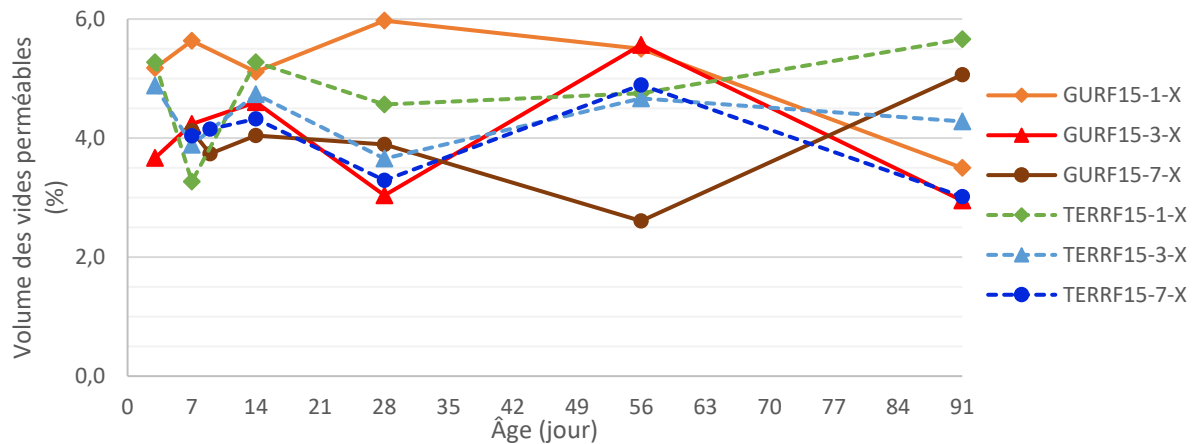


Figure 5-38 : Vides perméables de la phase préliminaire 3.2

Les bétons produits en phase 3 ont obtenu des valeurs d'absorption et de volume de vides perméables variant, respectivement, entre 2,03% et 3,67% et entre 4,72% et 8,14% (figure 5-39). Pour le liant GU, les données prélevées ne présentent pas de différence significative entre les bétons de laboratoire et de chantier. Les valeurs restent dans les plages de valeurs obtenues lors des phases précédentes. Pour le liant ternaire, les données sont très similaires malgré l'augmentation du volume d'air jusqu'à 10,7%. Il est important de noter que la mesure des vides est un essai offrant une grande variabilité, puisqu'il est influencé par la qualité de la consolidation des échantillons.

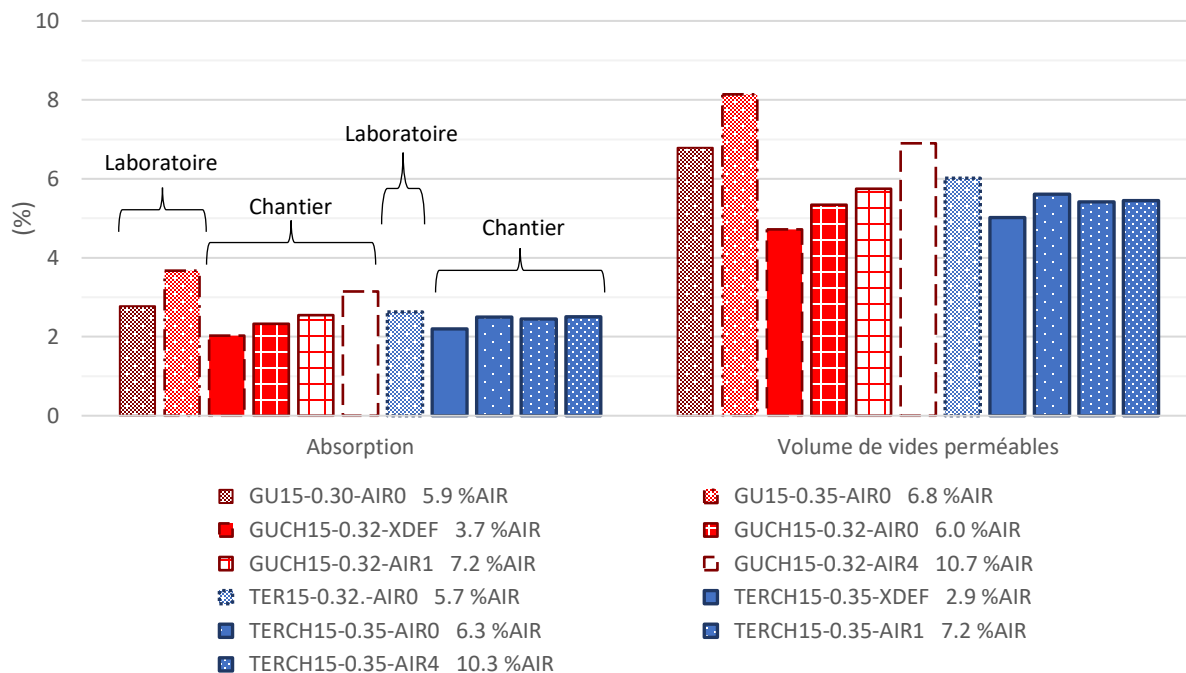


Figure 5-39 : Résultats d'absorption et de vides perméables de la phase 3

CHAPITRE 6 : ANALYSES ET DISCUSSIONS

6.1. La capacité d'entraînement d'air des BML

Les résultats expérimentaux ont été regroupés afin d'analyser les relations entre l'entraînement d'air et les caractéristiques du réseau de bulles d'air. Comme mentionné au chapitre 2, les BML sont reconnus pour avoir une capacité d'entraînement d'air naturelle et une interaction inconstante avec les AEA. Les résultats de cette section permettront de quantifier ce phénomène pour les liants GU et ternaire fabriqués autant en laboratoire qu'en bétonnière mobile.

Cette section de l'analyse utilise des figures présentées au chapitre 5.3. Les figures 5-7, 5-8 et 5-9 permettent d'analyser l'entraînement d'air des BML. Ces figures montrent que pour obtenir des caractéristiques semblables au béton produit en laboratoire, les BBM doivent avoir des dosages d'AEA supérieur à 150 mL/100 kg de ciment. Larose et Pigeon (1988) avaient obtenu des résultats semblables lors de leur étude où ils comparaient des BC produits en usine et en BM. Les données de l'étude montraient que les bétonnières mobiles créent des bulles d'air plus grosses que les usines à béton. La surface spécifique maximale obtenue par Larose et Pigeon était de 20 mm⁻¹. La surface spécifique des BML montre une tendance semblable, mais pour un maximum d'environ 15 mm⁻¹. Seulement un BBM a obtenu un α supérieur à 15 mm⁻¹ avec le liant ternaire et un dosage élevé d'AEA. Globalement, les résultats en bétonnière mobile et en laboratoire montrent qu'un fort dosage en AEA (>100 mL / 100 kg de ciment) améliore les caractéristiques du réseau de bulles d'air (augmentation du volume d'air, augmentation de la surface spécifique, diminution du \bar{L}). Un dosage supérieur à 150 mL / 100 kg de ciment permet généralement de produire un réseau d'air conforme ($\bar{L} < 230 \mu\text{m}$). Les résistances à la compression sont suffisamment élevées pour satisfaire la résistance spécifiée de 35 MPa malgré les forts volumes d'air obtenu (>8%)

Les figures 6-1 et 6-2 présentent, respectivement, la relation facteur d'espacement / volume d'air et la relation surface spécifique / volume d'air. Les marqueurs pleins sont les bétons produits en laboratoire. Cela permet de comparer l'effet du malaxage sur les propriétés du réseau de bulles d'air. Il est important de noter que le volume d'air pour le liant RapidSet Ile Verte est le volume d'air durci et non frais. Pour les deux figures, on observe 3 zones distinctes. La zone I présente les bétons fabriqués avec l'ADA. Les volumes d'air frais sont faibles (sous 4%) et produisent des bétons ayant des surfaces spécifiques faibles et des \bar{L} élevés pour les deux méthodes de

malaxage. Les zones II et III marquent une séparation entre les BL (II) et les BBM (III). On observe que les BBM produisent majoritairement des bétons ayant un α sous les 15 mm^{-1} et un \bar{L} supérieur à environ $340 \text{ }\mu\text{m}$. Par contre, lorsque les volumes d'air sont très élevés (supérieur à 10%) les caractéristiques du réseau d'air des BBM deviennent très proches de celles des BL. Cette séparation entre les BL et les BBM était présente dans les travaux de Larose et Pigeon.

Les figures 6-1 et 6-2 montrent, dans le cadre de cette étude, que pour la plage de teneur en air habituelle des BML sans AEA (4 à 8%) fabriqués en laboratoire ou en bétonnières mobiles, le réseau d'air n'est pas conforme aux spécifications de la norme 3101 (2017) du Ministère des Transports du Québec puisque le facteur d'espacement est supérieur à $230 \text{ }\mu\text{m}$.

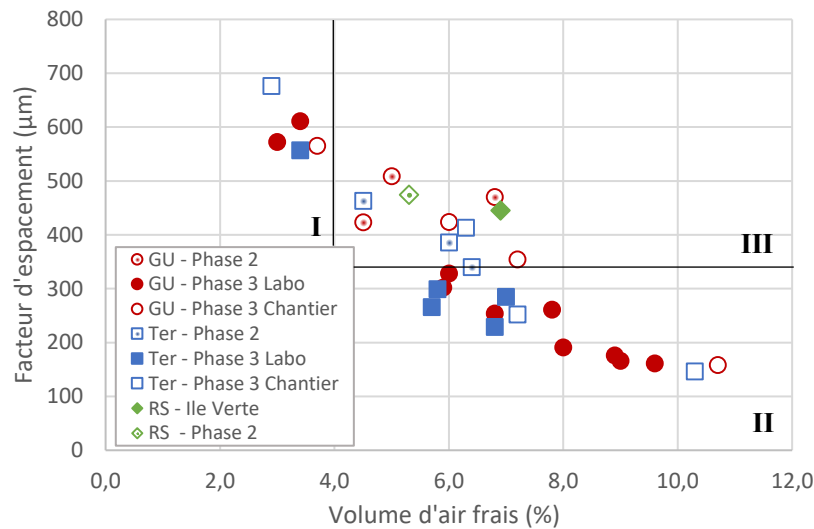


Figure 6-1 : Relation entre le facteur d'espacement et le volume d'air frais

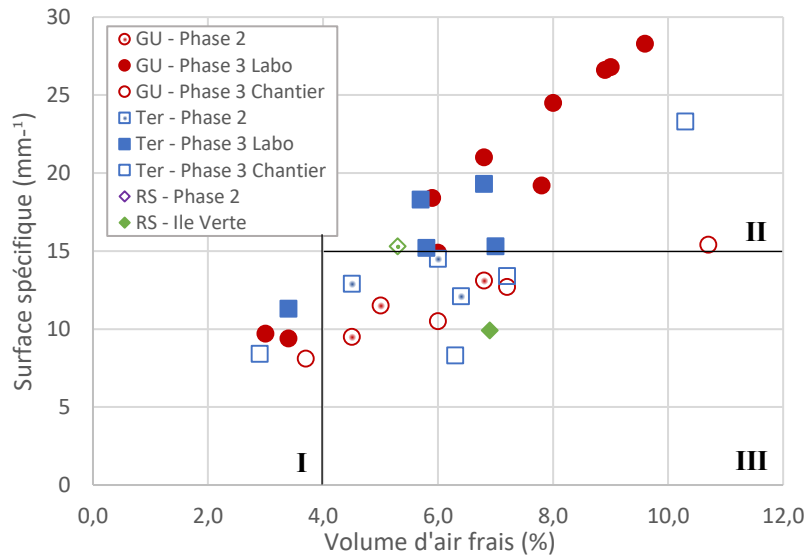


Figure 6-2 : Relation entre la surface spécifique et le volume d'air frais

6.2. Résistance à la fissuration interne

6.2.1. Interprétations des résultats des cycles de gel-dégel

Les résultats expérimentaux des phases du projet ont été regroupés afin d'analyser l'influence des caractéristiques de formulation et les conditions de mûrissement sur la résistance à la fissuration interne due aux cycles de gel et dégel. Ces relations sont importantes afin d'estimer le facteur d'espacement critique (\bar{L}_{crit}) pour chaque condition d'essai. Le facteur d'espacement critique est un indice de la durabilité à la fissuration interne d'une formulation de béton. Plus \bar{L}_{crit} est élevé, plus la durabilité au gel-dégel du béton est élevée. Le facteur de durabilité peut être obtenu à partir de deux approches : la relation entre le facteur d'espacement et l'allongement après 300 cycles de gel-dégel et la relation entre le facteur d'espacement et le facteur de durabilité. En plus du facteur d'espacement critique, une surface spécifique seuil est aussi étudiée. Celle-ci est aussi déterminée à partir de deux relations : la relation entre la surface spécifique et l'allongement après 300 cycles de gel-dégel et la relation entre la surface spécifique et le facteur de durabilité. Les courbes de tendance tracées sur les graphiques de ces relations mettent en évidence le seuil de durabilité. Les courbes utilisées pour mettre en évidence ce seuil ont été déterminées selon une interprétation visuelle des résultats. L'analyse de la surface spécifique seuil est utile puisqu'elle permet de bien comprendre l'influence du latex et de l'agent entraîneur d'air sur la dimension moyenne des bulles d'air formées.

Les figures 6-3 et 6-4 présentent les relations entre le facteur d'espacement et le facteur durabilité et les déformations pour le liant GU. Sur ces graphiques, une courbe a été ajoutée pour aider à estimer la valeur du facteur d'espacement (\bar{L}_{crit}) séparant les bétons durables des bétons non durables au gel-dégel.

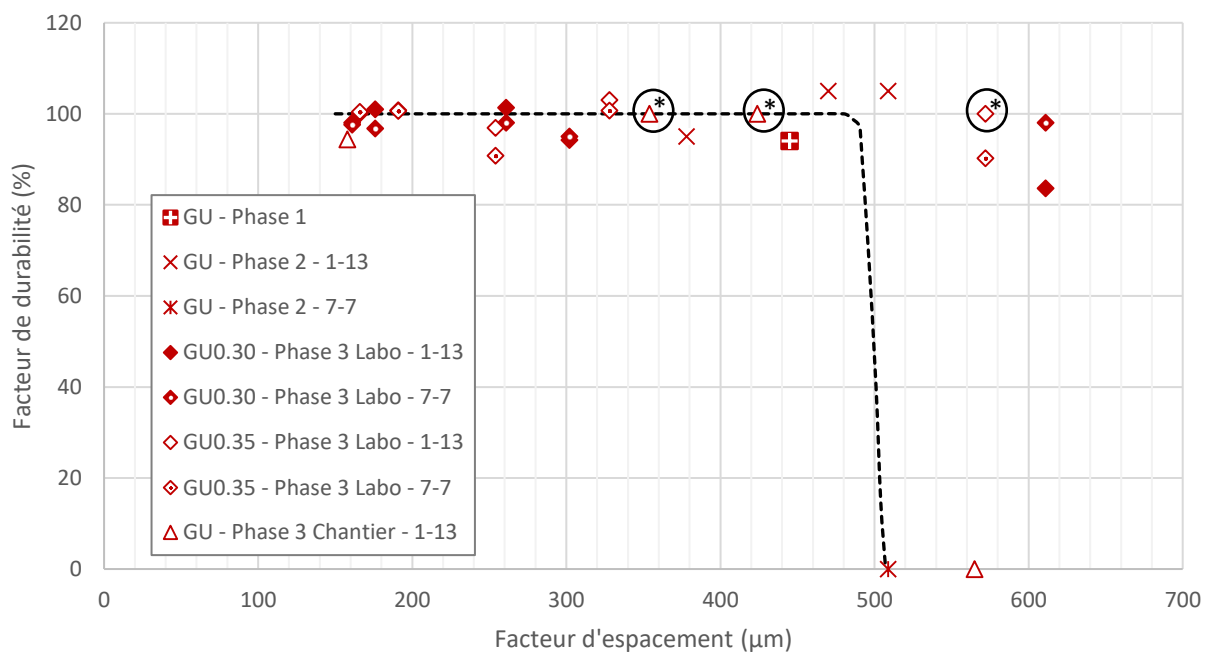
Globalement, les résultats de la figure 6-3 montrent que pour le liant GU, un facteur d'espacement inférieur à 500 μm produit systématiquement un BML durable au gel-dégel, quel que soit le type de cure, le rapport E/L (0,30-0,35) et le type de malaxage (laboratoire et chantier). Toutefois, les bétons GU Phase 2 cure humide et les bétons GU Phase 3 Chantier cure latex ne sont pas durables. Ces deux types de bétons ont été produits en chantier avec une bétonnière mobile. Ces résultats suggèrent que la production en bétonnière mobile produit des BML moins durable que les BML similaires ($500 \mu\text{m} \leq \bar{L} \leq 600 \mu\text{m}$) produit en laboratoire qui eux, se sont avérés durables (Phase 3 en laboratoire).

Les résultats de la figure 6-4 montrent la relation entre l'allongement à 300 cycles de gel-dégel et le facteur d'espacement. Lors de l'analyse des résultats de l'étude, il a été établi que le critère limite de déformation par la norme ASTM C666 de 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ n'est pas représentatif. En raison de la comatrice latex-ciment des BML, les prismes se déforment davantage (sans diminution de propagation de l'onde sonore) et donc la limite de déformation acceptable dans ce projet est fixée à 2000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Selon ce critère, on constate que les BML avec un facteur d'espacement inférieur à 500 μm sont toujours durables, quelles que soient les conditions d'essais (Cure, rapport E/L, méthode de malaxage). Globalement, la figure 6-4 confirme que la valeur critique du facteur d'espacement des BML avec liant GU est de 500 μm .

La figure 6-5 montre la relation entre la surface spécifique et le facteur de durabilité. On constate que la surface spécifique peut, elle aussi, être utilisée pour prédire la durabilité de BML. Tous les BML ayant une surface spécifique supérieure à environ 12 mm^{-1} sont durables. Les autres BML avec une surface spécifique inférieure à 12 mm^{-1} ne sont pas toujours durables au gel-dégel. C'est notamment le cas de deux BML produits en bétonnière mobile. Ces résultats sont globalement compatibles avec ceux des figures 6-3 et 6-4.

Les BML (Liant GU) possédant un réseau de bulles d'air ayant une surface spécifique supérieure à 12 mm^{-1} et un facteur d'espacement inférieur à 500 μm se sont révélés toujours durables au

gel-dégel. Cette condition est systématiquement atteinte lorsque le volume d'air est supérieur à 5%, tel que démontré aux figures 6-1 et 6-2.



* : La durabilité de ces bétons provient de l'analyse en fonction de la déformation.

Figure 6-3 : Facteur de durabilité en fonction du facteur d'espacement - Liant GU

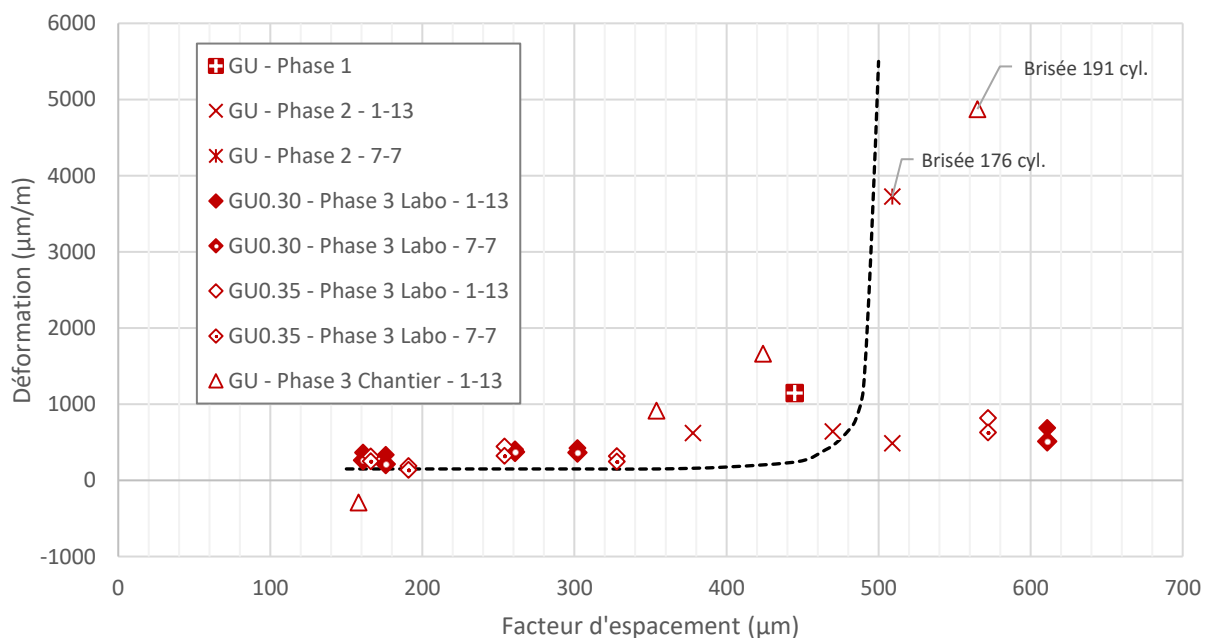
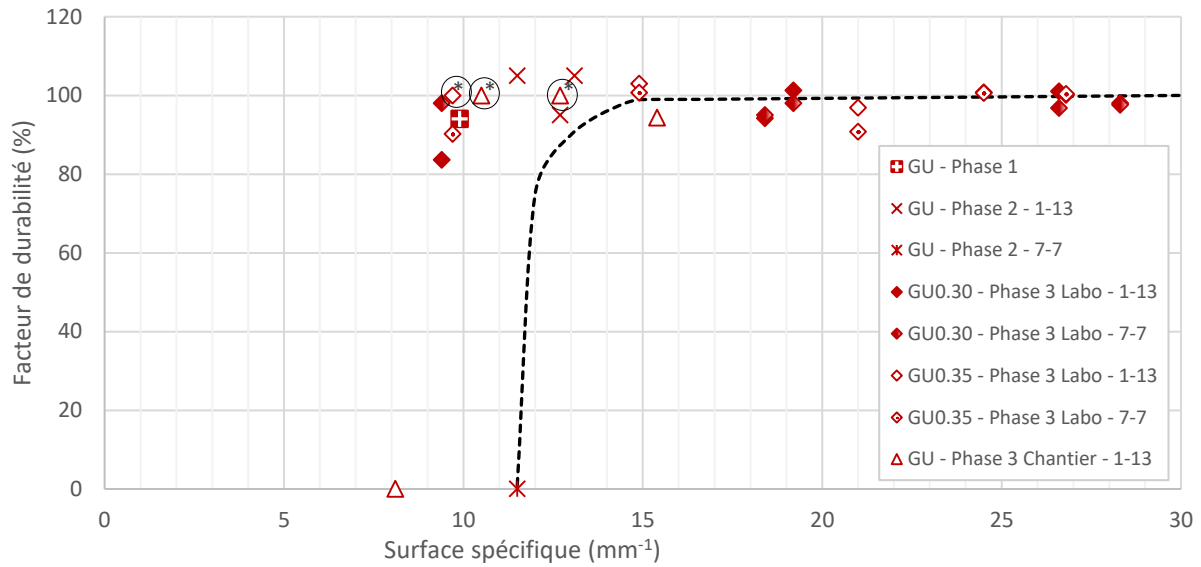


Figure 6-4 : Déformation en fonction du facteur d'espacement - Liant GU



* : La durabilité de ces bétons provient de l'analyse en fonction de la déformation.

Figure 6-5 : Facteur de durabilité en fonction de la surface spécifique - Liant GU

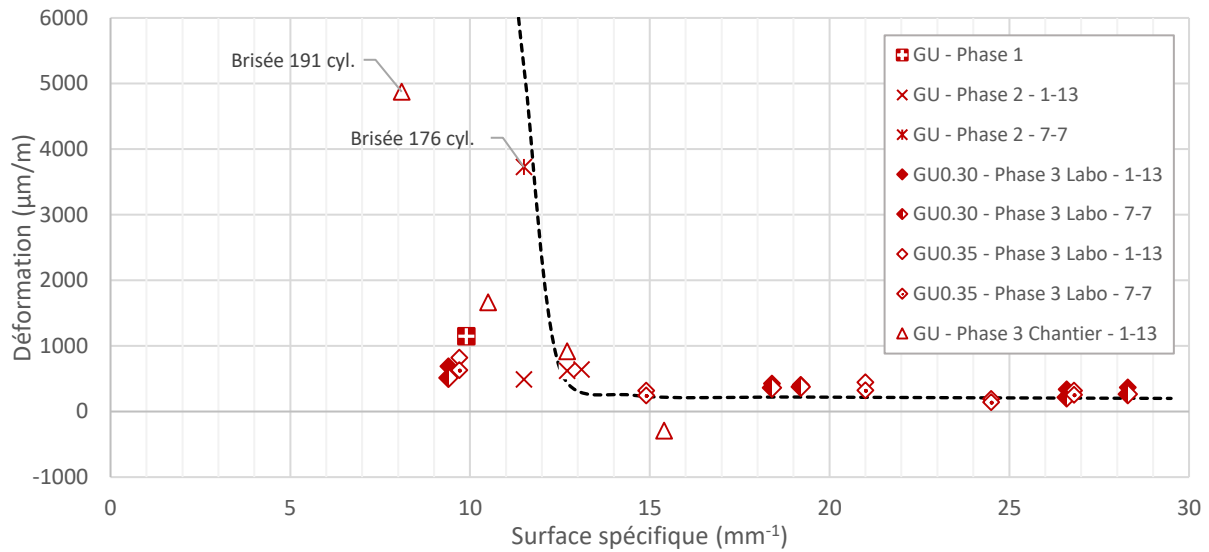


Figure 6-6 : Déformation en fonction de la surface spécifique - Liant GU

La figure 6-7 montre la relation entre le facteur d'espacement et le facteur de durabilité des BML fabriqués avec le liant ternaire. Pour interpréter ces résultats, deux critères peuvent être utilisés. Le premier, spécifier par l'ASTM et l'ACI est qu'un béton durable doit avoir un facteur

de durabilité supérieur à 60%. Le second, spécifié par le ministère des Transports du Québec (MTQ), est que le facteur de durabilité doit être supérieur à 80% pour être considéré durable au gel-dégel. Selon le premier critère ($F.D. > 60\%$), le facteur d'espacement critique (\bar{L}_{crit}) est d'environ 300 μm . Contrairement au liant GU, certains BML avec liant ternaire ayant un facteur d'espacement compris entre 300 et 500 μm peuvent donc être considérés non durables, dépendamment du critère retenu. Globalement, ces résultats suggèrent que la durabilité des BML avec liant ternaire semble légèrement inférieure à celle des BML avec liant GU. En effet, pour le liant GU, tous les bétons avec un facteur d'espacement inférieur à 500 μm ont pu satisfaire le critère plus sévère de 80% pour le facteur de durabilité.

Les résultats de la figure 6-8 montrent la relation entre le facteur d'espacement et l'allongement après 300 cycles de gel-dégel es BML produit avec le liant ternaire. Tel que discuté précédemment, l'allongement maximal d'un béton durable est fixé à 2000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Selon ce critère, on constate que les BML durables ont un facteur d'espacement à 500 μm . Donc, si le facteur d'espacement d'un BML avec liant ternaire est inférieur à 500 μm , ces bétons sont durables aux gel-dégel, quelles que soient les conditions d'essai (type de cure, méthode de malaxage). En appliquant le critère d'allongement de 2000 $\mu\text{m}/\text{m}$, ces résultats suggèrent que le critère de 60% pour la limite du facteur de durabilité semble plus valable que celui de 80%. En effet, avec le critère de 60%, on obtient le même facteur d'espacement critique, sur la base de l'analyse du facteur de durabilité et de l'allongement après 300 cycles de gel-dégel.

La figure 6-9 montre la relation entre la surface spécifique et le facteur de durabilité. La surface spécifique seuil, c'est-à-dire celle qui sépare les bétons durables des bétons qui ne sont pas systématiquement durables, dépend du critère choisi pour le facteur de durabilité. Pour le critère de 80% ($F.D. > 80\%$), la surface spécifique seuil est d'environ 17 mm^{-1} . Pour le critère de 60% ($F.D. > 60\%$), la surface spécifique seuil est d'environ 13 mm^{-1} . Les résultats de la figure 6-10 suggèrent que le critère de 60% semble le meilleur pour prédire la durabilité au gel-dégel des BML avec liant ternaire. En effet, la courbe seuil indique qu'une surface spécifique d'environ 13 mm^{-1} permet toujours d'obtenir des bétons durables dont l'allongement à 300 cycles est inférieur à 2000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Globalement, les BML avec liant ternaire ayant une surface spécifique supérieure à 13 mm^{-1} et un facteur d'espacement inférieur à 500 μm sont durables face aux cycles de gel-dégel. Tout comme pour les BML avec liant GU, ces caractéristiques du réseau

d'air entraîné sont atteintes lorsque le volume d'air entraîné est supérieur à 5%, comme le montrent les figures 6-1 et 6-2.

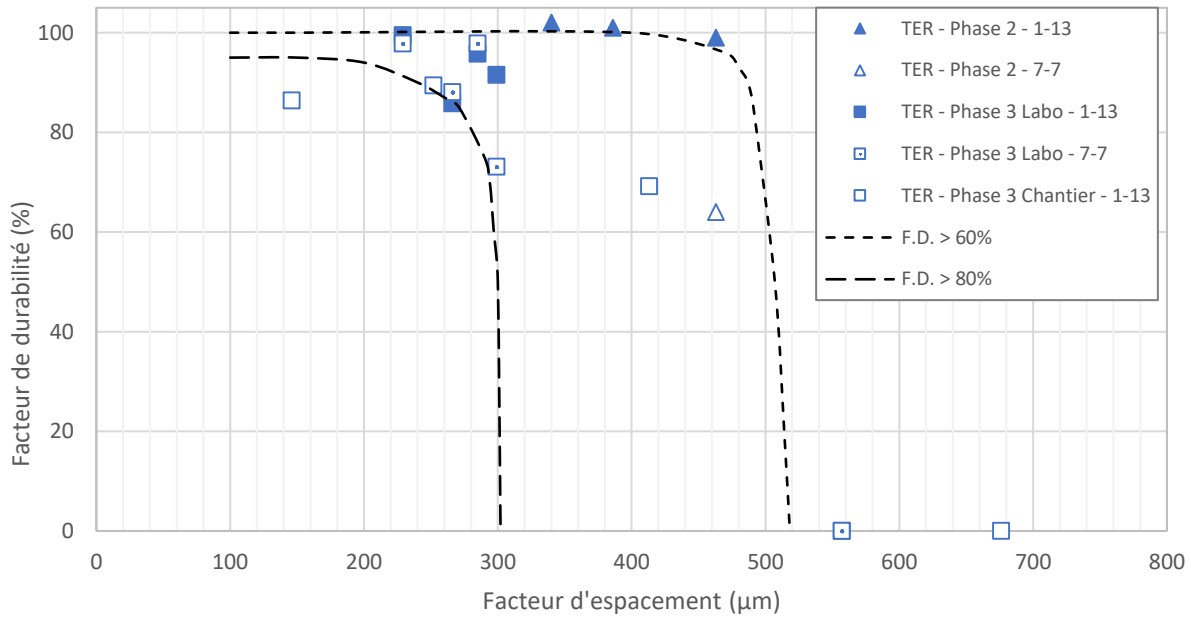


Figure 6-7 : Facteur de durabilité en fonction du facteur d'espacement - Liant ternaire

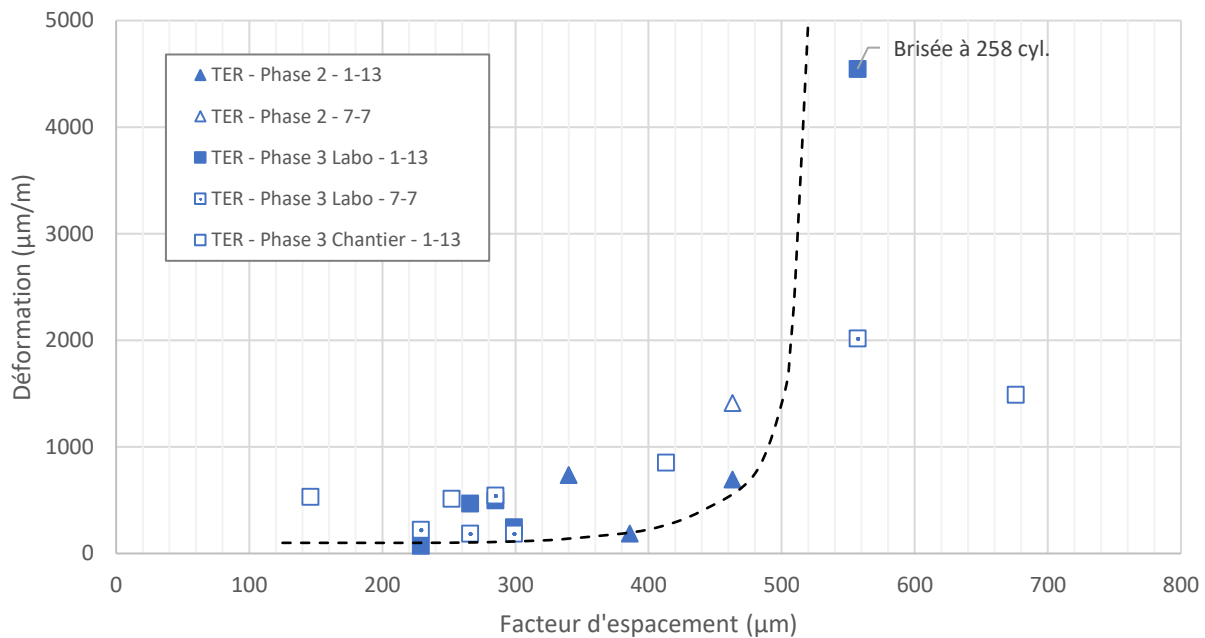


Figure 6-8 : Déformation en fonction du facteur d'espacement - Liant ternaire

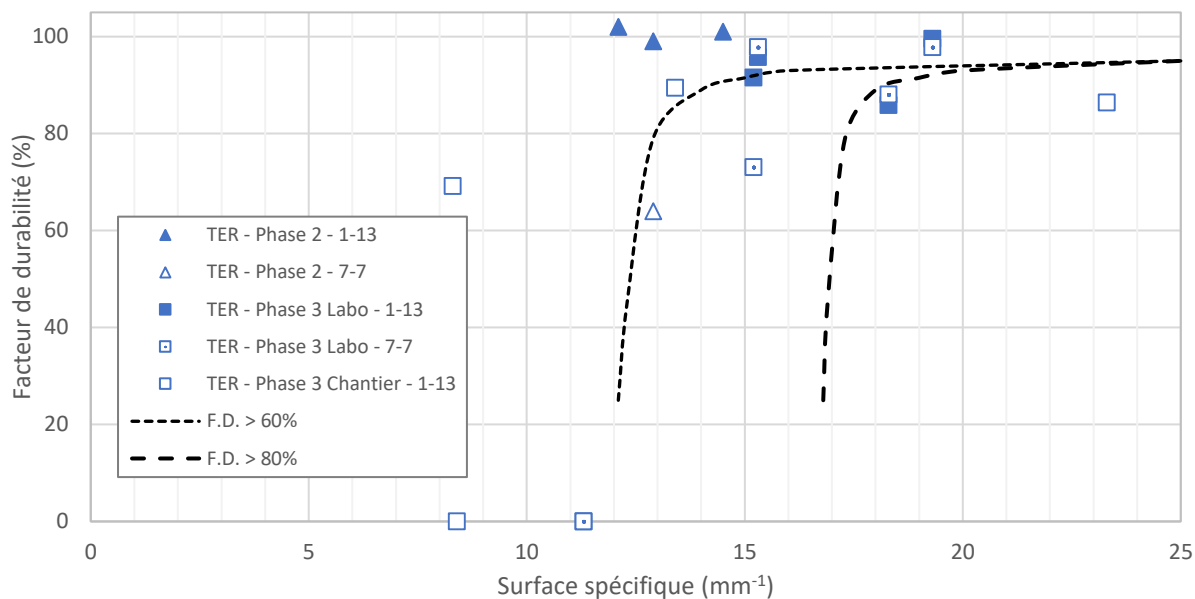


Figure 6-9 : Facteur de durabilité en fonction de la surface spécifique - Liant ternaire

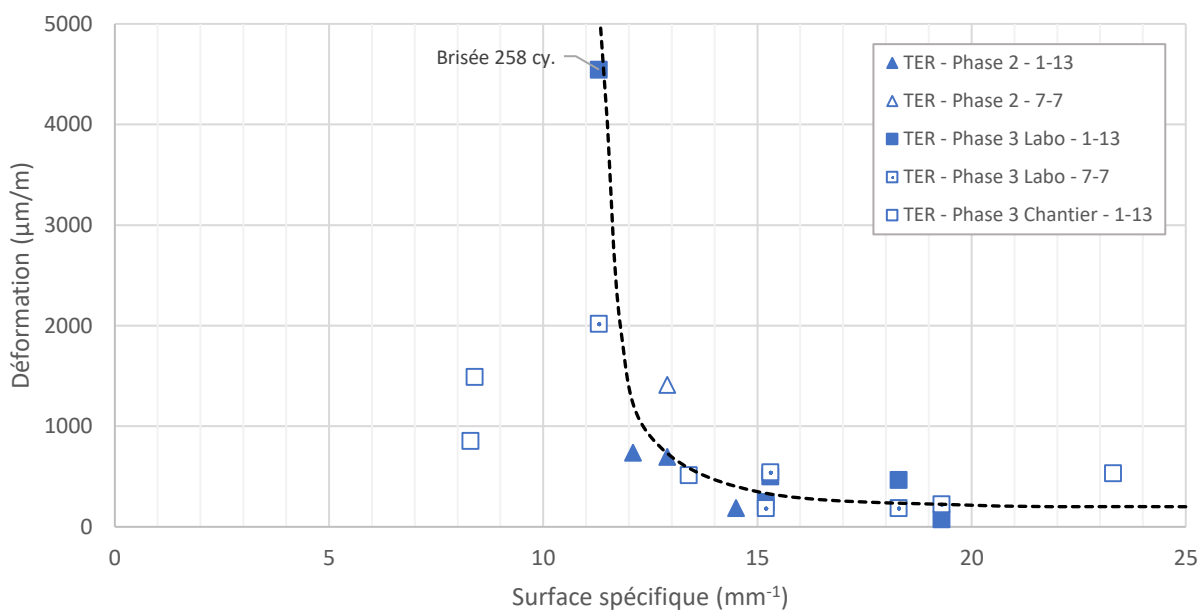


Figure 6-10 : Déformation en fonction de la surface spécifique - Liant ternaire

Le BML fabriqué avec le liant RapidSet se montre durable lors de l'essai ASTM C666 et ce malgré un facteur d'espacement de 474 μm et une surface spécifique de 15,3 mm⁻¹. Puisque lors des phases 2 et 3, un seul béton a été fabriqué avec le liant RapidSet, il n'est pas possible de déterminer un facteur d'espacement critique pour ce type de liant.

6.2.2. Influence du prolongement de la cure humide

Cette section vise à analyser plus en détail, l'influence du type de cure sur la durabilité au gel-dégel des BML fabriqués avec le liant GU et le liant ternaire. Le tableau 6-1 présente les résultats de tous les bétons ayant subi les deux types de cure, soit la cure latex (1 jour humide et 13 jours de séchage à 50% H.R.) et la cure hybride ou prolongée (7 jours humide et 7 jours de séchage à 50% H.R.). Les bétons du tableau 6-1 peuvent se retrouver dans les zones I, II et III des figures 6-1 et 6-2. Les bétons localisés dans la zone II sont tous durables. Il n'est donc pas possible de conclure sur l'effet du type de cure.

Plusieurs bétons des zones I et III ont montré une durabilité faible ou déficiente. L'influence du type de cure peut donc plus facilement être analysée, puisque dans ces cas, une amélioration de la durabilité a pu être mesurée avec un type de cure en particulier. Ces cas particuliers sont indiqués par des résultats présentés sur fond vert et sur fond ocre dans le tableau 6-1. Pour ce sous-ensemble de bétons, le type de cure a influencé la durabilité face aux cycles de gel-dégel.

Deux bétons produits en bétonnière mobile avec le liant GU (GUCH15-0.32-AUT17) et avec le liant ternaire (TERCH15-0.35-AUT17) ont montré un facteur de durabilité plus élevé et un allongement plus faible dans le cas de la cure latex. Ces deux bétons sont indiqués par un fond vert dans le tableau 6-1. Ils ont la particularité d'avoir des caractéristiques de vides d'air à la frontière entre les bétons durables et les bétons non durables ($\bar{L} = 450$ à $500 \mu\text{m}$; Volume d'air = 4 à 5%; $\alpha = 11$ à 13 mm^{-1}). Pour ces deux bétons, la cure latex a été favorable ce qui a alors permis de la faire basculer du côté des bétons durables. L'effet favorable de la cure latex découle probablement d'une meilleure coalescence sur les surfaces internes de la porosité capillaire et aussi d'un assèchement/désaturation partielle de la porosité capillaire lors de la période de séchage.

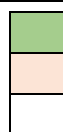
Trois bétons produits en laboratoire avec les liants GU et ternaire montrent une amélioration de la durabilité, mais cette fois avec la cure hybride (GU15-0.30-XDEF, GU15-0.35-XDEF et TER15-0.32-XDEF). Ceux-ci sont indiqués par les résultats sur fond ocre dans le tableau 6-1. Les trois bétons ont un très faible volume d'air, obtenu avec un agent désentraîneur d'air (XDEF). Les deux bétons avec le liant GU sont durables (F.D. > 80% et allongement < 2000 $\mu\text{m/m}$), mais la cure hybride a produit une légère diminution de l'allongement à 300 cycles. Elle semble donc avoir un effet favorable sur la durabilité au gel-dégel. Le béton avec liant ternaire

n'est pas durable pour les deux types de cure (F.D. < 80%; allongement > 2000 $\mu\text{m/m}$). Cependant, sur la base de l'allongement, la cure hybride semble favorable, car elle a produit un allongement nettement plus faible après 300 cycles de gel-dégel.

Globalement, pour les trois cas où la cure hybride a été favorable, l'effet de cette cure est moins net que dans le cas de la cure latex. Par exemple, elle n'a pas permis de rendre durable un béton non durable avec la cure latex. L'effet légèrement favorable de la cure hybride n'est observé qu'avec des bétons ayant un très faible volume d'air (< 4%) obtenu avec un ADA. Par conséquent, l'ensemble des essais de gel-dégel tendent à montrer que la cure latex devrait être privilégiée pour tester la durabilité au gel-dégel des BML.

Tableau 6-1 : Valeurs de durabilité des formulations avec cure latex et cure hybride

Formulation	Volume d'air frais (%)	\bar{L} (μm)	α (mm-1)	Cure humide					
				Facteur de durabilité (%)			Déformation ($\mu\text{m/m}$)		
				Cure latex	Cure hybride	Écart	Cure latex	Cure hybride	Écart
Bétonnière mobile									
GUCH15-0.32-AUT17	5	509	11.5	105	0	105	488	3726	3238
TERCH15-0.35-AUT17	4.5	463	12.9	99	64	35	694	1412	718
Laboratoire									
GU15-0.30-XDEF	3.4	611	9.4	84	98	14.4	690	512	178
GU15-0.30-DEF	7.8	261	19.2	101	98	3.3	408	376	32
GU15-0.30-AIR0	5.9	302	18.4	94	95	0.8	424	364	60
GU15-0.30-AIR1	8.9	176	26.6	101	97	4.2	336	216	120
GU15-0.30-AIR4	10	161	28.3	98	98	0.4	366	264	102
GU15-0.35-XDEF	3	572	9.7	100	90	90.2	818	630	188
GU15-0.35-DEF	6	328	14.9	103	101	2.3	320	246	74
GU15-0.35-AIR0	6.8	254	21.0	97	91	6.1	444	324	120
GU15-0.35-AIR1	8	191	24.5	101	101	0.2	190	140	50
GU15-0.35-AIR4	9	166	26.8	100	100	0.3	316	254	62
TER15-0.32-XDEF	3.4	557	11.3	0	0	0	4546	2018	2528
TER15-0.32-DEF	5.8	299	15.2	92	73	18.5	246	188	58
TER15-0.32-AIR0	5.7	266	18.3	86	88	2.2	468	186	282
TER15-0.32-AIR1	7	285	15.3	96	98	2.1	500	544	44
TER15-0.32-AIR4	6.8	229	19.3	100	98	1.7	74	224	150



: Cure latex avantageuse

: Cure hybride avantageuse

: Aucun effet dû à la cure (Tous les bétons sont durables)

6.3. Résistance à l'écaillage

Les résultats expérimentaux des phases du projet ont été regroupés afin d'analyser les effets des paramètres de formulation et des conditions de cure sur la résistance à l'écaillage. Ces relations sont importantes afin de déterminer la présence d'un facteur déterminant tel le facteur d'espacement critique des bulles d'air. L'analyse tiendra compte du type de liant, de la qualité du réseau d'air, du prolongement de la cure humide et du type de malaxage. Les masses moyennes de débris ainsi que leur variabilité font partie intégrante de cette analyse.

Les bétons fabriqués avec les deux liants possèdent des réseaux d'air ayant un \bar{L} variant de 146 à 676 μm . En général, la majorité des bétons ont obtenu une performance adéquate, soit sous la limite de 500 g/m² imposée par le MTQ. Les figures 6-11 à 6-14 présentent les résultats aux essais d'écaillage pour les deux types de liant, ainsi que pour les trois phases du projet. Ces graphiques permettent de mettre en évidence des relations entre la qualité du réseau d'air (facteur d'espacement et surface spécifique) et la résistance à l'écaillage. Les figures 6-11 et 6-12 présentent la performance à l'écaillage des BML fabriqués avec le liant GU, la relation entre le facteur d'espacement et la masse de débris à 56 cycles est présentée à la figure 6-11. La figure 6-12 présente la relation entre la surface spécifique des bulles d'air et la masse de débris.

Les résultats de la figure 6-11 montrent qu'il n'y a pas de relation évidente entre le facteur d'espacement et la durabilité à l'écaillage des BML fabriqués avec le liant GU. En effet, quelle que soit la valeur du facteur d'espacement (150 à 625 μm), on constate que la plupart des BML ont une résistance à l'écaillage conforme. Même avec un facteur d'espacement très élevé (supérieur à 300 μm), la très grande majorité des BML sont résistants à l'écaillage. Cette durabilité est différente de celle des bétons conventionnels, pour lesquels un facteur d'espacement inférieur à 200-250 μm est essentiel pour l'obtention d'une bonne durabilité à l'écaillage. Puisque la plupart des BML testés à l'écaillage ont une bonne résistance, on ne peut dégager une influence claire du rapport E/L (0,30 et 0,35), ni du mode de production (chantier et laboratoire) sur la durabilité à l'écaillage. Cependant les résultats de la figure 6-11 montrent clairement l'influence du type de cure sur la durabilité à l'écaillage des BML avec liant GU. L'analyse des points de mesure liés par des flèches vertes montre clairement que l'utilisation de la cure latex produit systématiquement une augmentation de la durabilité à l'écaillage.

Toujours à la figure 6-11, les trois BML n'ayant pas une résistance à l'écaillage conforme ont tous été soumis à une cure hybride (C.Hum). Ces mêmes trois BML soumis à une cure latex développent néanmoins une très bonne durabilité à l'écaillage, et ce, malgré un facteur d'espacement aussi élevé que 550 μm . Ces résultats confirment que la durabilité à l'écaillage des BML avec liant GU est très élevée et nettement supérieure à celle d'un béton conventionnel. La cure latex, plus représentative de la cure réelle utilisée en chantier, est nettement favorable. Cet effet favorable pourrait découler d'une meilleure coalescence du film de latex sur les surfaces internes de la porosité des bétons. La durée prolongée du séchage de la cure latex favorise probablement cette coalescence. La figure 6-12 montre la très bonne durabilité à l'écaillage des BML fabriqués avec le liant GU et aussi l'influence favorable de la cure latex sur la durabilité à l'écaillage. On constate qu'un réseau de bulles d'air comportant une surface spécifique moyenne aussi faible que 7 mm^{-1} peut produire un BML (liant GU) durable à l'écaillage.

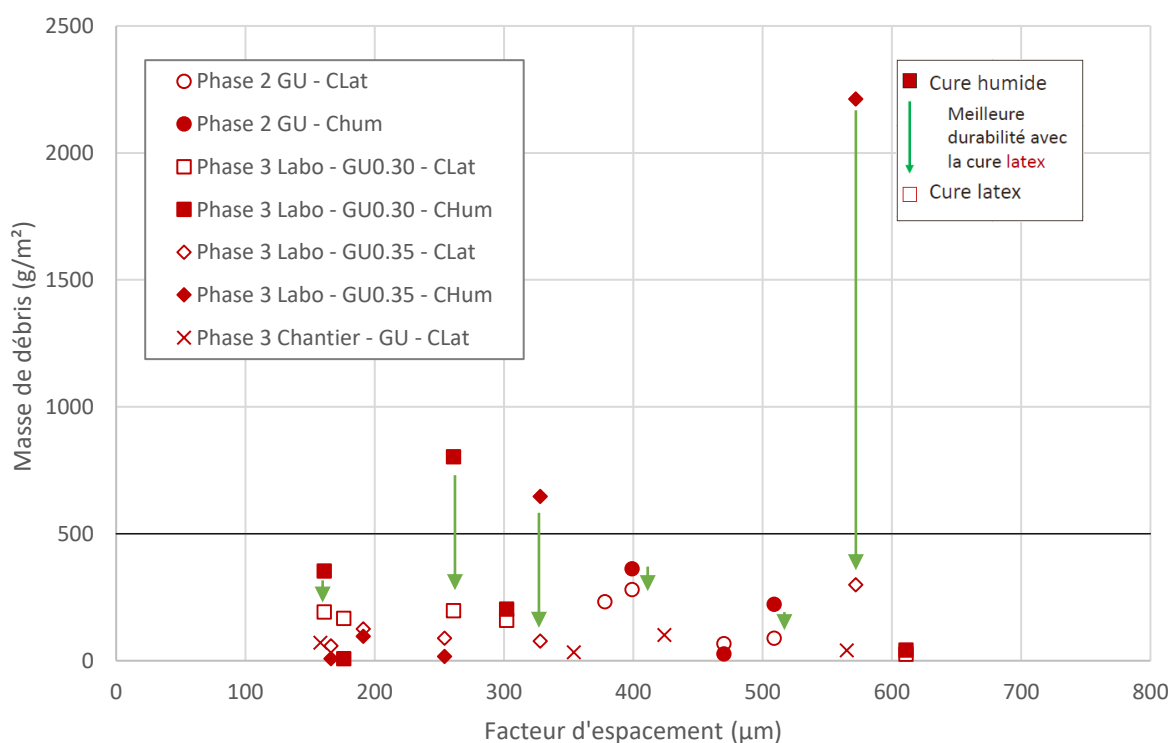


Figure 6-11 : Masse de débris en fonction du facteur d'espacement de la phase 3 - Liant GU

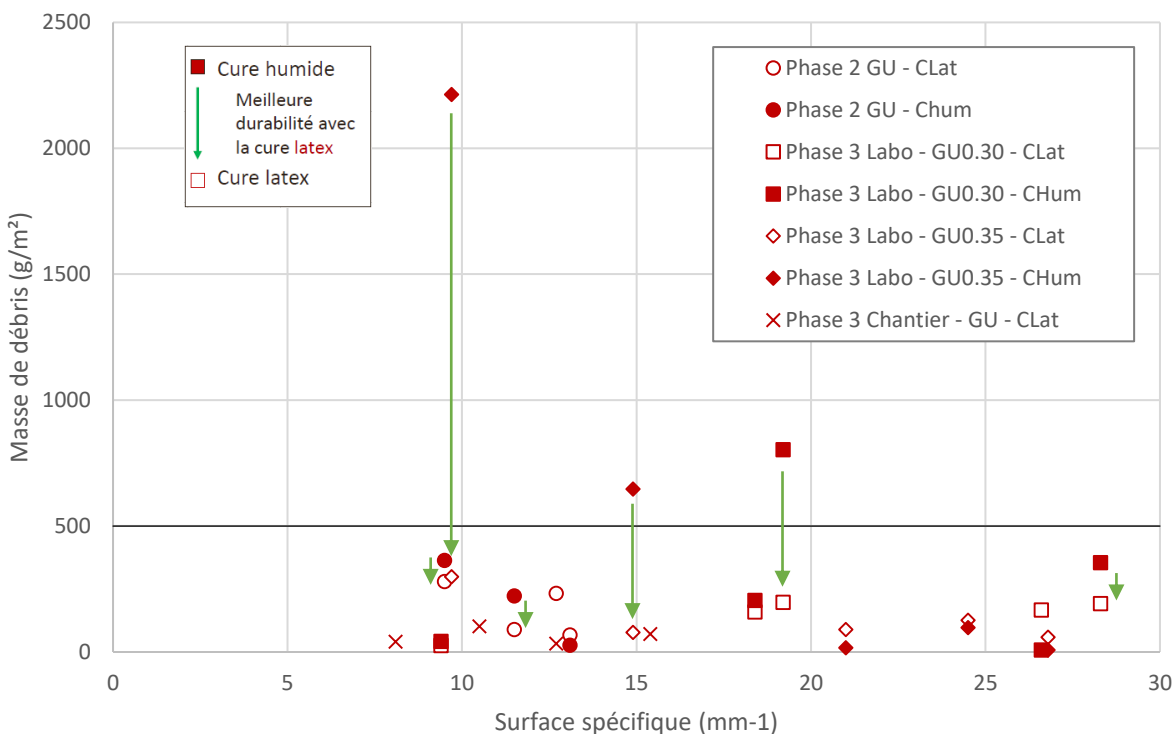


Figure 6-12 : Masse de débris en fonction de la surface spécifique de la phase 3 - Liant GU

La figure 6-13 présente la relation entre le facteur d'espacement et la résistance à l'écaillage des BML fabriqués avec le liant ternaire. On constate qu'à nouveau, il n'y a pas de relation claire entre la qualité du réseau de bulles d'air et la résistance à l'écaillage. Quelle que soit la valeur du facteur d'espacement, la plupart des BML avec liant ternaire montrent une bonne durabilité à l'écaillage. En effet, des BML avec un facteur d'espacement supérieur à 500 μm montrent une excellente durabilité à l'écaillage. Comme dans le cas de BML fabriqué avec le liant GU, on ne peut pas conclure sur l'influence du mode de production (chantier et laboratoire).

Les résultats de la figure 6-13 montrent que trois BML de cette série ont une durabilité non conforme. Ces BML possèdent les facteurs d'espacement suivant : 285, 386 et 463 μm . Il n'est pas possible d'expliquer ces résultats non conformes. Un problème de finition de surface pourrait être une cause possible.

L'analyse de certains résultats de la figure 6-13 permet de mieux comprendre l'influence du type de cure sur la durabilité à l'écaillage des BML fabriqués avec le liant ternaire. À l'inverse des BML avec le liant GU, la cure hybride (C.Hum) produit une meilleure résistance pour les

BML fabriqués avec le liant ternaire. En effet, dans le cas des points de mesure reliés par des flèches vertes, on constate que la cure hybride produit systématiquement une meilleure résistance à l'écaillage que la cure latex. Il est probable que le prolongement de la cure humide permette une meilleure hydratation de la cendre volante. Ce matériau a besoin d'une plus longue période de cure pour s'hydrater. La cure hybride, qui comporte 14 jours à 100% H.R., procure probablement l'humidité nécessaire pour une meilleure hydratation de la cendre volante contenue dans le liant ternaire. Donc, globalement, on peut supposer que dans le cas des BML avec liant ternaire, la cure humide prolongée a des effets favorables sur l'hydratation semblent compenser l'effet défavorable de la cure hybride sur la coalescence du latex sur les surfaces internes de la porosité du béton.

La figure 6-14 confirme les résultats et l'analyse de la figure 6-13. Elle montre que même avec un réseau de bulles d'air de faible qualité (surfaces spécifiques comprises entre 7 et 15 mm⁻¹) la durabilité à l'écaillage des BML avec liant ternaire est, à quelques exceptions près, conforme à l'exigence maximale de 500 g/m². Pour s'assurer de toujours obtenir une durabilité conforme d'un BML avec liant ternaire, il serait souhaitable d'éviter de produire un réseau de bulles d'air ayant une surface spécifique moyenne inférieure à 15 mm⁻¹.

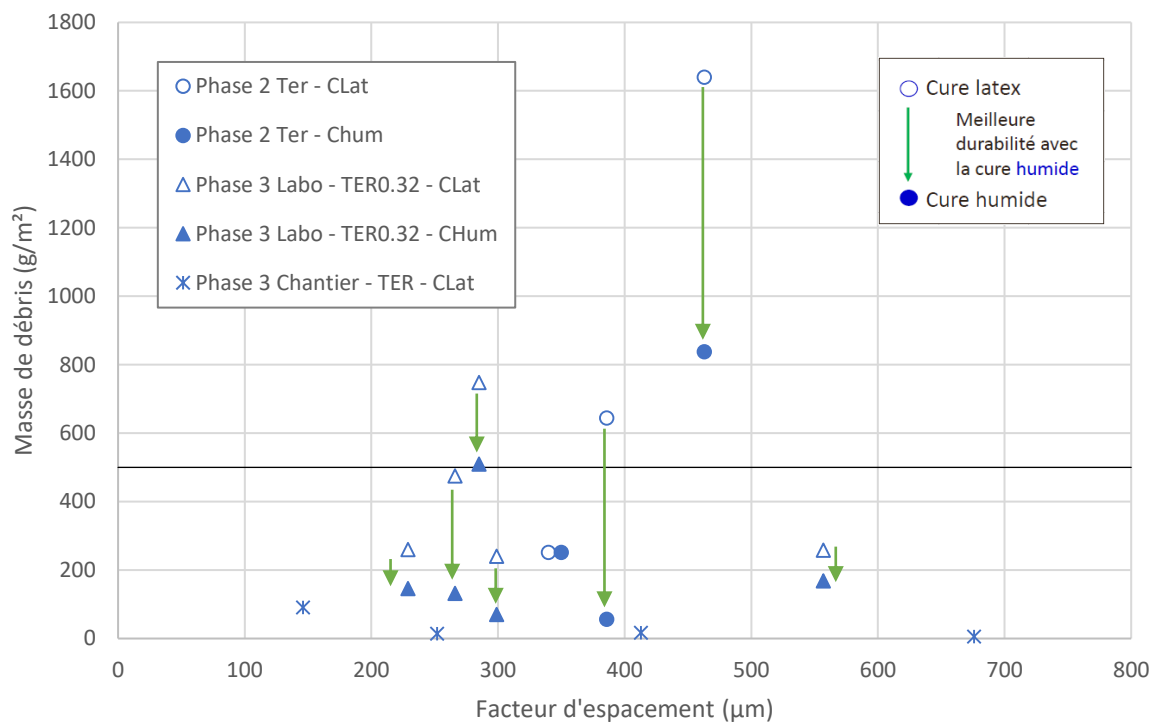


Figure 6-13 : Masse de débris en fonction du facteur d'espacement de la phase 3 - Liant ternaire

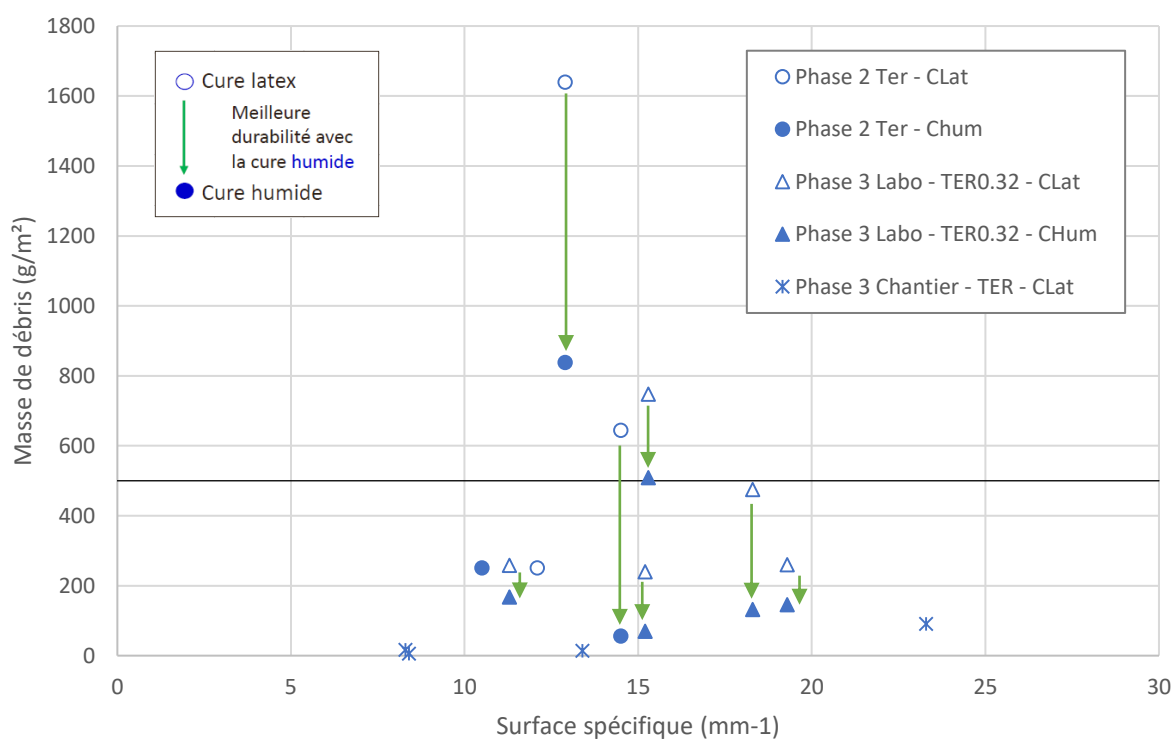


Figure 6-14 : Masse de débris en fonction de la surface spécifique de la phase 3 - Liant ternaire

6.4. Perméabilité aux ions chlorure

6.4.1. Influence du prolongement de la cure humide

La figure 6-15 présente les données obtenues lors de la phase préliminaire 3.2. Ces résultats ont été superposés avec les résultats extraits de la section 4.1.3.3.4 du rapport ACI 548.3-09 « Report on polymer concrete » (ACI Committee 548, 2009). Ces valeurs, datant de 1984, sont indiquées par des marqueurs noirs dans la figure 6-15. Ces bétons ont été fabriqués avec un liant GU et le rapport E/L est inconnu. Comme démontré dans la section précédente, le rapport E/L a un impact sur la perméabilité aux ions chlorure pour un béton à jeune âge. En comparant avec les données de l'étude et du rapport ACI, les résultats de cette étude sont dans la plage décrite dans le rapport ACI. On constate qu'il existe une grande variation à 28 jours, probablement dû au rapport E/L non précisé. On observe qu'une cure humide plus longue a un léger impact sur la performance à l'essai ASTM C1202. Par contre, à long terme, cet effet n'est pas significatif puisque les perméabilités tendent vers les mêmes valeurs après 91 jours. On remarque aussi que le liant ternaire offre une performance nettement supérieure à court et long terme. Néanmoins, la différence entre les deux liants s'atténue à 91 jours, puisque les deux liants offrent une perméabilité très faible selon le tableau 6-2, puisque les résultats des essais sur le liant ternaire sont légèrement supérieurs à 100 coulombs. Dans une optique d'essai de performance, il serait plus réaliste de prévoir une spécification à 91 jours. Cela permettrait d'obtenir un résultat plus représentatif de la réalité du BML en service.

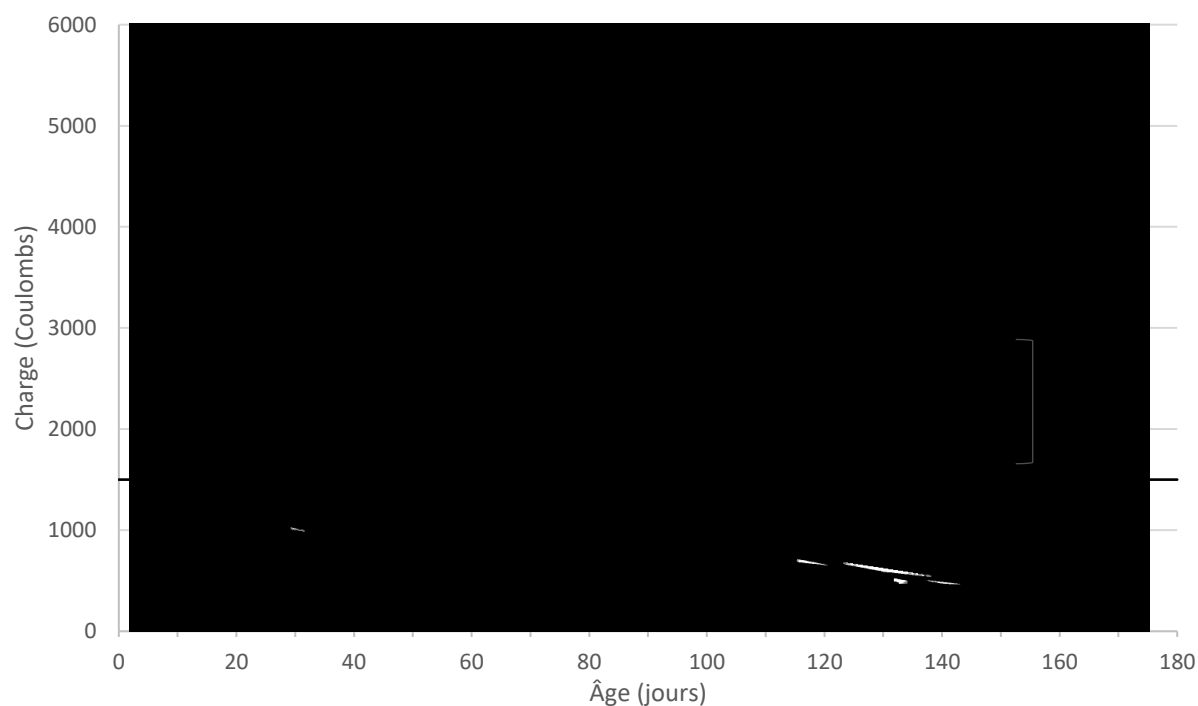


Figure 6-15 : Perméabilité aux ions chlorures - Étude vs ACI

Tableau 6-2 : Échelle des perméabilités aux ions chlorures

Perméabilité aux chlorures	Charge totale <i>Coulombs</i>
Haut	4000 et plus
Modéré	2000 à 4000
Faible	1000 à 2000
Très faible	100 à 1000
Négligeable	Moins de 100

Le tableau 6-3 présente le gain dû au prolongement de la cure humide pour le liant GU. Les données ont été comparées aux données produites par la cure latex. À un âge de 14 jours, la cure humide de 3 jours présente une amélioration de 15% tandis que la cure humide de 7 jours offre une performance semblable à la cure latex. Le film de latex dans la matrice est possiblement moins bien polymérisé pour le béton soumis à la cure humide de 7 jours. À 28 jours, le gain dû au séchage est présent pour le béton de 7 jours de cure humide. La cure humide de 7 jours a une perméabilité supérieure aux deux autres cures. À partir de 56 jours, comme mentionnés à la section 5.6, les résultats, toutes cures confondues, sont semblables. Pour le liant ternaire, les

résultats de la section 5.6 montrent que le prolongement de la cure humide n'a aucune influence sur l'essai de perméabilité aux ions chlorure.

Tableau 6-3 : Pourcentage de gain à l'essai ASTM C1202 dû au prolongement de la cure humide - Liant GU

Âge du béton	Durée de la cure humide	
	3 jours	7 jours
14 jours	15%	2%
28 jours	15%	25%

6.4.2. Influence du volume d'air et du rapport E/L

Les figures 6-16 et 6-17 présentent les charges totales en fonction du volume d'air frais dans les BML fabriqués avec le liant GU (Fig. 6-16) et, avec le liant ternaire (Fig. 6-17). Les données sont organisées selon le mode de production, le rapport E/L et l'âge de l'essai. La figure 6-16 qu'il n'y a pas de corrélation entre le volume d'air frais et la perméabilité aux ions chlorures, mais le rapport E/L influence les perméabilités des BML avec liant GU. Les formulations avec un rapport E/L plus élevé ($E/L = 0,35$) présentent des perméabilités de plus de 2500 coulombs. Pour les liants ternaires (figure 6-17), il ne semble pas y avoir de corrélation avec le volume d'air frais. La diminution du rapport E/L semble avoir un impact positif sur les perméabilités. Par contre, ces gains sont négligeables, puisque le liant ternaire produit toujours une charge totale sous les 1000 coulombs dès 28 jours. Comme mentionné au chapitre 2.4.2, le latex et la fumée de silice, densifiant l'ITZ, permet d'obtenir des perméabilités très faibles malgré des possibles variations de rapport E/L.

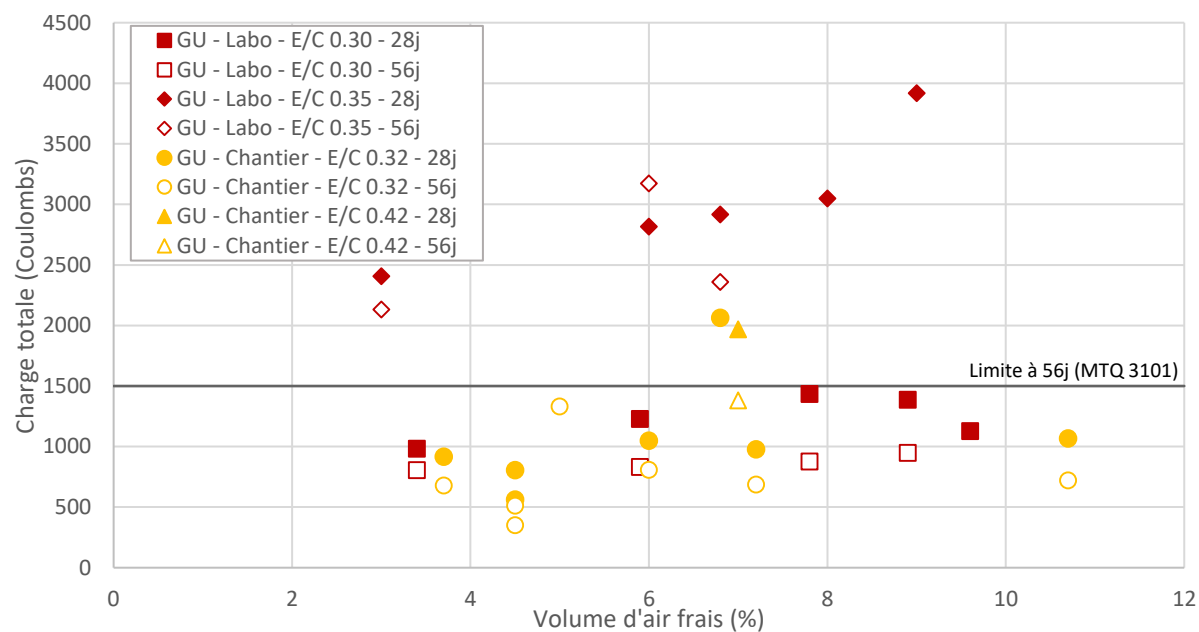


Figure 6-16 : Influence du volume d'air frais sur la perméabilité des ions chlorure - Liant GU

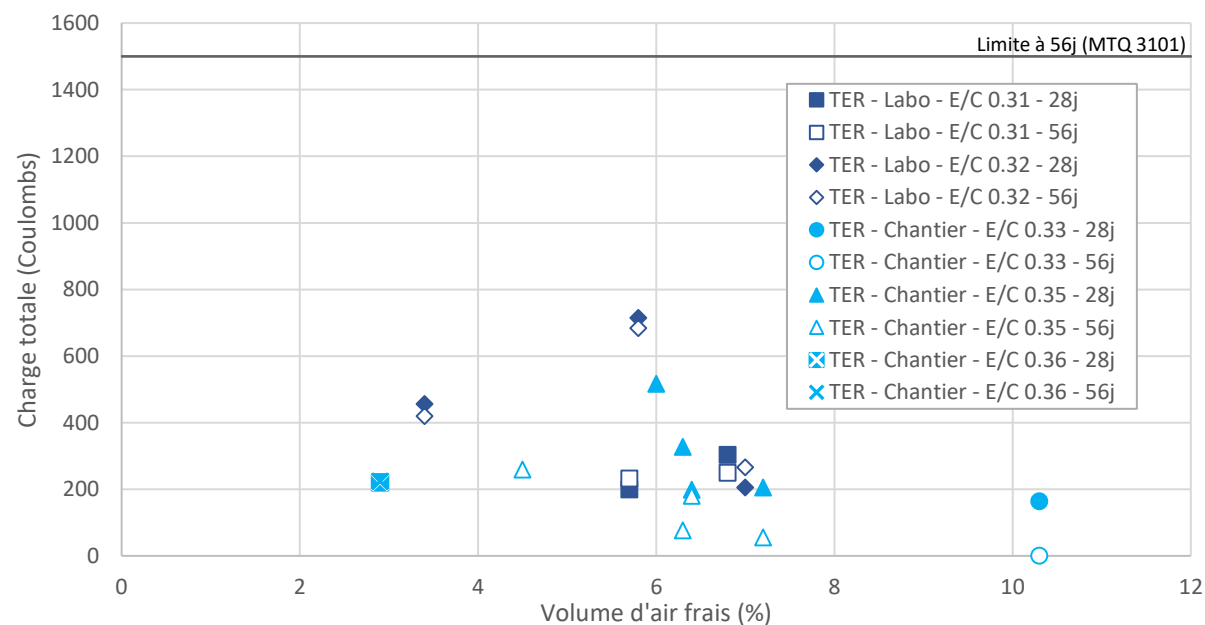


Figure 6-17 : Influence du volume d'air frais sur la perméabilité des ions chlorure - Liant ternaier

CHAPITRE 7 : CONCLUSION

Ce projet de recherche a permis de mieux comprendre la durabilité en climat nordique des BML. Les résultats ont permis de comprendre l'influence des paramètres suivants : le type de liant, le rapport E/L, le réseau de bulles d'air, le type de malaxage, le type de cure. L'analyse de ces résultats permet de dégager les principales recommandations et conclusions suivantes :

- Les résultats obtenus du BML de l'Île Verte montrent le caractère durable de ce type de béton selon les essais normalisés. Les faibles résultats de perméabilité aux ions chlorure (16 coulombs) montrent la tendance des BML à long terme à obtenir une perméabilité négligeable. Ce résultat s'apparente aux résultats obtenus dans le rapport de l'ACI (voir chapitre 6.4). Ce BML atteint les critères de durabilité pour les essais ASTM C666 et BNQ 2621-905 et ce après une vie en service de 30 ans. Ces résultats sont comparables aux résultats de réparation de dalle similaire tels que présentés au tableau 4-9. Ceux-ci viennent corroborer la durabilité in situ des BML et ce même avec des réseaux de vides d'air considéré déficient pour un béton conventionnel.
- Tous les BML formulés selon les spécifications XVI-15 ont obtenu une résistance à la compression supérieure à 35 MPa à 28 jours et ce pour les trois liants étudiés (GU, ternaire et RapidSet). Les BML fabriqués avec les liants GU et ternaire ont présenté des résistances semblables, tandis que le BML fabriqué avec le liant RapidSet a présenté des résistances en moyenne supérieure de 10 à 15 MPa.
- Les résultats de l'étude montrent qu'il est possible d'entraîner de l'air dans les BML. L'entraînement d'air est alors contrôlé par le dosage en AEA et le type de malaxage. À un faible dosage en AEA (50mL/100 kg de ciment), le volume d'air entraîné n'est pas constant entre les gâchées. Pour un même volume d'air frais, les bétons produits avec une bétonnière mobile présentent des réseaux de bulles d'air contenant des bulles plus grosses et plus espacées que les bétons produits en laboratoire. De plus, pour obtenir un réseau d'air de même qualité, le dosage d'AEA doit être supérieur lorsqu'il est produit avec une bétonnière mobile. Le dosage en AEA doit être supérieur à 150 mL/100kg de ciment pour obtenir une surface spécifique supérieure à 15 mm^{-1} lorsque fabriqué avec une bétonnière mobile. Toutefois, il est important de mentionner que cette étude ne vise pas à déterminer précisément le dosage seuil d'AEA afin d'obtenir une surface spécifique supérieure à 15 mm^{-1} . Les performances des BML face aux essais accélérés

de gel-dégel en laboratoire sont influencées par les caractéristiques du réseau de bulles d'air. Globalement, les BML étudiés sont significativement plus durables qu'un béton conventionnel de résistance équivalente.

- L'étude de la performance à la fissuration interne montre qu'un \bar{L}_{crit} de 500 μm avec un pour le liant GU produit un BML durable, peu importe les conditions d'essais. Au-delà de cette limite, la durabilité des BML est fonction des paramètres de formulation et de cure. Pour le liant ternaire, la valeur de \bar{L}_{crit} varie en fonction du facteur de durabilité choisi (60% ou 80%). Lorsque le facteur de durabilité est fixé à 60%, la valeur de \bar{L}_{crit} est d'environ 300 μm , alors que pour un facteur de durabilité fixé à 80%, la valeur de \bar{L}_{crit} monte à 500 μm .
- L'étude de la performance à la fissuration interne montre que la surface spécifique peut, elle aussi, être utilisée pour prédire la durabilité des BML. Pour les BML fabriqués avec le liant GU, la surface spécifique critique est de 12 mm^{-1} . Les BML ayant des surfaces spécifiques plus faibles ne se sont pas toujours montrés durables. Pour les BML fabriqués avec le liant ternaire, la valeur de surface spécifique critique varie en fonction du facteur de durabilité choisi (60% ou 80%). Lorsque le facteur de durabilité est fixé à 60%, la valeur de surface spécifique critique est d'environ 17 mm^{-1} , alors que pour un facteur de durabilité fixé à 80%, la valeur de surface spécifique critique est plutôt de 13 mm^{-1} .
- Dans le cas de la résistance à l'écaillage pour les BML fabriqués avec le liant GU, il n'est pas possible d'établir une corrélation claire entre les caractéristiques du réseau d'air et la prédiction de la durabilité puisque la majorité des BML sont durables à cet essai, et ce malgré des facteurs d'espacement de 611 μm . Ce constat est le même pour les BML fabriqués avec le liant ternaire. Néanmoins, le type de cure subi influence la performance à l'essai accéléré. Pour les BML fabriqués avec le liant GU, la cure latex, plus représentative de la cure réelle utilisée en chantier, est nettement favorable. Pour les BML fabriqués avec le liant ternaire, la cure hybride produit systématiquement une meilleure résistance à l'écaillage que la cure latex. Dans certains cas, le choix de cure fait la différence entre un BML présentant une durabilité déficiente et un BML rencontrant les exigences.

- La perméabilité aux ions chlorures de BML est très faible. Tous les types de liant utilisés dans ce projet ont produits des bétons à faible perméabilité (GU : ≈ 600 coulombs à 56j; TER : ≈ 100 coulombs à 56j; RapidSet: ≈ 18 coulombs à 28j). À plus long terme (91j), les perméabilités sont encore légèrement plus faibles. L'analyse du Pont de l'Île Verte permet d'établir que les perméabilités semblent continuer à diminuer avec le temps. Le prolongement de la cure humide a une influence bénéfique à jeune âge pour les BML avec le liant GU. Dès 28 jours, la coalescence du film de latex annule l'effet de la cure humide. Dans le cas des liants ternaires, le prolongement de la cure n'a aucun effet. Les résultats présentés dans cette étude démontrent que les BML formulés avec un rapport E/L de 0,35 satisfont largement l'exigence de 1500 coulombs à 56j.
- Pour le liant GU, le type de malaxage n'influence pas significativement l'essai ASTM C1202. Un béton fabriqué avec une bétonnière mobile d'un rapport E/L de 0,32 a une perméabilité aux ions chlorure semblable à celle d'un béton fabriqué en laboratoire avec un rapport E/L de 0,30. Pour le liant ternaire, le type de malaxage n'influence pas la perméabilité aux ions chlorures.
- L'essai des vides perméables (ASTM C642) démontre que les BML ont une porosité accessible à l'eau nettement inférieure à celle d'un béton conventionnel d'un même niveau de résistance. Toutefois, cet essai n'est pas suffisamment sensible et précis pour différencier la performance des BML en fonction du rapport E/L, du type de liant ou du type et de la durée de la méthode de cure.
- Au terme de cette étude, il semblerait judicieux que les spécifications à exiger pour les bétons modifiés au latex soient adaptées selon le type de liant. Et ce, en raison des résultats obtenus pour les essais de résistance à la fissuration interne et de résistance à l'écaillage.
 - À propos du paramètre de cure, les résultats de ce projet montrent que la cure du béton peut influencer la durabilité des BML selon le type de liant. Le tableau 7-1 montre le type de cure le plus avantageux pour chaque essai de durabilité en fonction du liant choisi. Il est important de noter que pour les BML en chantier comportant une importante surface exposée à l'air libre, une cure de 72h serait recommandée afin de limiter la fissuration plastique.

Tableau 7-1 : Type de conditionnement à privilégier selon le type d'essai

Essai normalisé		Liant GU	Liant Ternaire	Liant RapidSet
Résistance à la fissuration interne	Bétonnière mobile	Latex	Latex	N/E
	Laboratoire	Humide	Humide	N/E
Résistance à l'écaillage		Latex	Humide	Négligeable
Perméabilité aux ions chlorure		Négligeable après 91j	Négligeable	N/E

N/E : Non évalué

Ce projet permet aussi de proposer quelques pistes de recherches complémentaires.

- La durabilité in situ n'est pas toujours représentative de la durabilité potentielle estimée par l'essai accéléré ASTM C666. Il serait intéressant de comparer le niveau d'endommagement de bétons soumis à l'essai ASTM C666 à celui de bétons similaires exposés à des cycles de gel-dégel en service (in situ). Cela pourrait permettre de faciliter l'interprétation des résultats de l'essai ASTM C666 dans le cas particulier des BML.
- L'étude des paramètres affectant la coalescence du film de latex dans la matrice cimentaire permettrait de mieux comprendre comment se comporte le latex en fonction des différents environnements de cure et des différents liants.
- Une étude sur la performance de différents types d'AEA dans la formulation de BML.
- L'étude des paramètres de durabilité de BML pour les liants GUL et les liants avec des taux élevés de laitier en remplacement cimentaire serait intéressante, puisque ces types de liant sont utilisés plus fréquemment en raison de leur impact environnemental moindre.
- La modification des bétons à l'aide de polymère peut être effectuée avec plusieurs types de latex. Il serait intéressant d'évaluer, en contexte québécois, l'utilisation de différents types de latex dans les bétons modifiés aux polymères. Par exemple, la modification à l'aide de latex acrylique est permise dans le rapport du comité ACI 548.3. Par conséquent, il serait pertinent d'évaluer la durabilité dans l'environnement climatique québécois.

BIBLIOGRAPHIE

1. ACI 318. (2015). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): An ACI Standard: Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14), an ACI Report,.
2. ACI Committee 548. (2009). *Report on Polymer-Modified Concrete* (n° 548.3R-09) (p. 37). American Concrete Institute.
3. Bertrand, J. (2012, avril). *Performance of latex modified bridge decks overlays after 20+ years service* [international concrete repair institute].
4. Bordeleau, D., Pigeon, M. et Banthia, N. (1992). Comparative study of latex-modified concretes and normal concretes subjected to freezing and thawing in the presence of a deicer salt solution. *ACI Materials Journal*, 89(6), 547–553.
5. Choi, P., Jeon, S. I. et Yun, K.-K. (2015). Effect of fine fly ash and calcium hydroxide on air void structure in very-early-strength latex-modified concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(10), 797-807. <https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0013>
6. Gagné, R. (2017). Notes de cours GCI-714 : Durabilité et réparation du béton - Aut. 2017. Université de Sherbrooke.
7. Kuhlmann, L. et Foor, N. (1984). Chloride Permeability Versus Air Content of Latex Modified Concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 6(No. 1), 11-16.
8. Lapointe, R. (1996). *Répertoire et applicabilité des matériaux de réparation sur le marché* [mémoire]. Université McGill.
9. Larose, G. et Pigeon, M. (1988). Béton produit en bétonnière mobile et en usine conventionnelle : comparaison des caractéristiques du réseau de bulles d'air. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 15(3), 306-314. <https://doi.org/10.1139/l88-046>

10. Lou A. Kuhlmann. (1990). Test Method for Measuring the Bond Strength of Latex-Modified Concrete and Mortar. *ACI Materials Journal*, 87(4), 387-394.
11. Mehta, P. K. (1986). *Concrete: structure, properties, and materials*. Prentice-Hall.
12. Mindess, S. (2002). *Concrete* (0002-edition éd.). Prentice Hall.
13. Ohama, Y. (1987). PRINCIPLE OF LATEX MODIFICATION AND SOME TYPICAL PROPERTIES OF LATEX-MODIFIED MORTARS AND CONCRETES. *ACI Materials Journal*, 84(6), 511-518.
14. Pigeon, M. et Pleau, R. (1995). *Durability of Concrete in Cold Climates*. E & FN Spon.
15. Ramakrishnan, V. (1992). Synthesis of Highway Practice 179 : Latex-modified concretes and mortars. *National Cooperative Highway Research Program*, (179), 60.
16. Robert, M. (2018). Notes de cours GCI-722 : Dégradation des matériaux - Été 2018. Université de Sherbrooke.
17. Rossignolo, João A. et Agnesini, M. V. C. (2004). Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 375-380.
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00022-2)
18. Rossignolo, João Adriano. (2009). Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex. *Construction and Building Materials*, 23(2), 817-821.
19. Sakai, E. et Sugita, J. (1995). Composite mechanism of polymer modified cement. *Cement and Concrete Research*, 25(1), 127-135. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)00120](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)00120)
20. Sprinkel, M. (2016, avril). *The Effect of Extended Moist Curing on the Compressive Strength and Permeability of Latex-Modified Concrete* [aci convention].
21. Thomas, J. et Jennings, H. (2010, août). *The Science of Concrete*. Northwestern University.
<http://iti.northwestern.edu/cement/index.html>

22. Yang, Z., Shi, X., Creighton, A. T. et Peterson, M. M. (2009). Effect of styrene–butadiene rubber latex on the chloride permeability and microstructure of Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2283-2290.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.011>
23. Yun, K.-K., Kim, D.-H. et Choi, S.-Y. (2004). Durability of Very-Early-Strength Latex-Modified Concrete Against Freeze-Thaw and Chemicals. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1893), 1–10.
24. Zeng, S. (1996, Juin). *Polymer modified cement : Hydration, microstructure and diffusion properties* [thèse de doctorat]. Aston University.

ANNEXE A – Tableau 3101-2 du chap.3, Tome VII de la norme 3101

Tome VII	
Chapitre 3	Norme 3101
Page 4 de 13	
Date 2017 12 15	

BÉTONS ET PRODUITS CONNEXES
3.1 Bétons
Bétons de masse volumique normale



NORME

Tableau 3101-2
Caractéristiques des bétons de masse volumique normale pour les ouvrages d'art

Type	Résistance à 28 jours (MPa)	Masse min. liant (kg/m ³)	Type de liant	Rapport eau/liant max. ou dans l'intervalle	Gros granulats (mm)	Teneur en air (%)	Affaissement (mm)		Étalement (mm) ± 50	T _{max} (µm)	Perméabilité aux ions chlorure max. (coulombs)	Écaillage – Masse de débris max. après 56 cycles (kg/m ²)
							± 30	± 40				
V	35	340 365	GUb-SF GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,45	5-20	5-8	80 ⁽¹⁾	—	—	230	1500	—
V-DC	35	340	GUb-SF	0,35	5-20	5-8	— ⁽²⁾	—	—	230	1000	—
V-P	35	390 410	GUb-SF, HEB-SF, HEB-N GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,45	5-14 5-20	5-8	150	—	—	230	1000	—
V-S	35	340 365	GUb-SF GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,38 à 0,42	5-20	5-8	130	—	—	230	1000	0,50
VIII	50	410	GUb-SF	0,37	5-14	5-8	—	180	—	230	1000	—
IX	60	410	GUb-SF	0,35	5-14	5-8	—	180	—	230	1000	—
XI	30	340 330	GU, GUL, GUb-S GUb-SF, GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,50	5-20	4-7	150	—	—	—	—	—
XIII	50	410	GUb-SF, GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,34 à 0,38	5-14	5-8	170	—	—	230 ⁽⁷⁾	1000	—
XIV-C	35 ⁽³⁾	400 420	GUb-SF GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,45	5-14	6-9	—	—	625	230 ⁽⁸⁾	1000	—
XIV-R	35 ⁽³⁾	460	GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,35 à 0,40 ⁽⁴⁾	2,5-10 ⁽⁵⁾	6-9	—	—	675	230 ⁽⁸⁾	1000	—
XIV-S	35	—	GUb-SF, GUb-F/SF, GUb-S/SF	—	2,5-10	5-9	—	—	650	300	1500	—
XV	35	450	GUb-SF	0,42	2,5-10 ⁽⁶⁾	6-9	—	200	—	230	1500	—
XVI-5	35	390	GUb-SF, GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,40	2,5-10	5-9	120	—	—	230	1000	—
XVI-15 ⁽⁹⁾	35	390	GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,40	2,5-10 5-14	4-8	170	—	—	— ⁽¹⁰⁾	1500	0,50
XVII	35	400 420	GUb-SF GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,41	5-14 5-20	6-9	—	—	500	230	1000	—
XVII-P	35	380	GUb-SF	0,40	5-14 5-20	6-9	—	—	500	230	1000	—

- Notes :**
- Après ajout de superplastifiant, l'affaissement doit être de 120 ± 30 mm.
 - Béton à affaissement nul.
 - La résistance à la compression minimale à 48 heures doit être de 10 MPa.
 - Le rapport volumique sable/(liant-eau+air) doit être compris entre 0,6 et 0,8.
 - Le volume maximal de gros granulat est de 330 litres du volume total du mélange.
 - La proportion de granulat fin doit être entre 45 et 55 %, pourcentage calculé par rapport au granulat total.
 - À la sortie de la pompe, le facteur d'espacement doit être inférieur ou égal à 325 µm.
 - À la sortie de la pompe, le facteur d'espacement doit être inférieur à 260 µm.
 - Les 28 ± 8 premières heures de cure sont en condition humide. Par la suite la cure des éprouvettes doit être réalisée à une température de 23 ± 2 °C et à humidité ambiante du laboratoire.
 - Module d'élasticité de 80 % au minimum à 300 cycles selon la norme ASTM C666 « Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing ». Les résultats sont valides pour une durée de 3 ans après la publication du rapport d'évaluation.
- Notes :**
- La nomenclature des types de béton correspond à :
 - V-DC : Béton sans affaissement pour la préfabrication (*dry cast*)
 - V-P : Béton de préfabrication
 - V-S : Béton superplastifié
 - XIV-C : Béton autoplaçant de construction
 - XIV-R : Béton autoplaçant de réparation
 - XIV-S : Béton autoplaçant de réparation en sac
 - XV : Béton antillessivage
 - XVI-5 : Béton latex 5 %
 - XVI-15 : Béton latex 15 %
 - XVII : Béton semi-autoplaçant
 - XVII-P : Béton semi-autoplaçant de préfabrication

ANNEXE B – Échéancier du projet

	2017	2017	2018	2018	2018
	mai-août	sept.-déc.	janv.-avril	mai-août	sept.-déc.
Phase 0 : Stage de recherche - Université de Sherbrooke					
0.1 - Caractérisation des BML (laboratoire et usine)					
0.2 - Influence du mûrissement sur KCl.					
Phase 1 : Caractérisation in-situ					
1.1 - Durabilité de BML prélevé in-situ.					
Phase 2 : Prélèvement de BML frais en chantier					
2.1 - Référence sur les données de durabilité des BML.					
2.2 - Comparaison des l'efficacité des liants.					
2.3 - Influence du mûrissement sur la durabilité.					
Phase 3 : Production de BML en conditions contrôlées					
3.1 - Influence du type de mélangeur, E/C, teneur en air, L-bar					
3.2 - Analyse et synthèse de la phase 1, 2, 3					
3.3 - Rédaction du mémoire.					

ANNEXE C – Procédure LS-413 du MTO

Ministry of Transportation, Ontario
Laboratory Testing Manual

Test Method LS-413, Rev. No. 26
Date: 11 05 01 Page 1 of 3

METHOD OF TEST FOR NON-VOLATILE CONTENT OF CHEMICAL ADMIXTURES, LATEX ADMIXTURES AND CURING COMPOUNDS

1. SCOPE

1.1 This method covers the determination of non-volatile content (%) for concrete chemical admixtures (liquid), latex modifiers and curing compounds.

2. RELEVANT DOCUMENTS

2.1 ASTM C 494 18.2

2.2 ASTM D 1644

3. DEFINITION

3.1 Determination of the fraction of an admixture that is relatively stable at the temperature of the test while solvents are driven off.

4. CHEMICAL ADMIXTURES

4.1 PROCEDURE

Procedure of ASTM C 494, clause 18.2 shall be followed for determination of non-volatile content of chemical admixtures.

4.1.1 General

Two 0.75-litre samples of admixture shall be delivered to the laboratory for each test. One 0.75-litre sample shall be used for acceptance testing and the second 0.75-liter sample shall be reserved for referee testing.

Immediately after admixture samples are delivered to the testing laboratory, each bottle shall be properly identified by a laboratory number, and date and time of arrival noted.

4.1.2 Testing

One 0.75-litre sample shall be used for testing of non-volatile content and other properties, as required. The second 0.75-litre sample shall be stored, protected from freezing and high temperatures, until it is delivered to the designated referee laboratory or disposed of.

4.1.3 Procedure on Arrival at the Designated Referee Laboratory

Immediately after arrival of referee admixture sample at the designated referee laboratory, the sample shall be properly identified by a laboratory number, and date and time of arrival noted.

Testing of referee admixture sample shall be carried out according to this test method.

4.2 REPORTING OF RESULTS

The report shall include the non-volatile content of the chemical admixture to the nearest 0.1 percent.

5. LATEX ADMIXTURES

5.1 APPARATUS

5.1.1 Syringe without needle, 10 mL

5.1.2 Aluminum dishes - approximately 60 mm in diameter, 15 mm in depth, 2 g or less in mass, and disposable

5.1.3 Oven - ventilated, $140 \pm 2^{\circ}\text{C}$, forced circulation type or one with provision for free access of air

5.1.4 Desiccator

5.1.5 Balance - accurate to 0.001 g

5.2 PROCEDURE

5.2.1 Weigh each of three aluminum dishes to nearest 0.001 g.

5.2.2 Thoroughly mix sample. Place a portion of mixed sample in a 10 mL syringe with needle and discharge 1.2 ± 0.1 g into each of the aluminum dishes. Record the mass of each dish plus sample to nearest 0.001 g.

5.2.3 By gently tilting, spread specimen over the bottom of the aluminum dish.

5.2.4 Heat in oven at $140 \pm 2^{\circ}\text{C}$ for 2 hours.

5.2.5 Remove from oven, cool in desiccator and weigh the dish.

5.3 CALCULATION

$$S = \frac{C - A}{B - A} \times 100$$

where S = Non-volatile content, percent

A = Mass of aluminum dish, g

B = Mass of aluminum dish and wet latex specimen, g

C = Mass of aluminum dish and dried specimen after heating, g

5.4 REPORTING OF RESULTS

The report shall include the non-volatile content of the latex admixture to the nearest 0.1 percent.

6. CURING COMPOUNDS

6.1 APPARATUS

6.1.1 Syringe without needle, 10 mL

6.1.2 Metal or glass dishes, approximately 80-100 mm in diameter, 5-15 mm in depth.

6.1.3 Oven-ventilated, $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$, forced circulation type or one with provision for free access of air.

6.1.4 Desiccator

6.1.5 Balance - Accurate to 0.001 g

6.2 PROCEDURE

- 6.2.1 Weigh each of three dishes to nearest 0.001 g.
- 6.2.2 Thoroughly mix sample by stirring in closed container. Avoid trapping air in sample.
- 6.2.3 Place representative sample in a 10 mL syringe without needle and discharge $1.2 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$ into each of the dishes.

Note 1: To control evaporation loss weigh syringe each time after discharge and record.

- 6.2.4 By gently tilting, spread specimen over the bottom of the aluminum dish.
- 6.2.5 Heat in oven at $105 \pm 2^\circ\text{C}$ for 3 hours.
- 6.2.6 Remove from oven, cool in desiccator, and weigh the dish.

Note 2: Three specimens constitute a test.

Note 3: If necessary, a piece of stout wire can be included in the tare of the dish and used at intervals to break up skins by stirring during the heating period.

6.3 CALCULATION

$$S = \frac{C - A}{B - A} \times 100$$

where S = Non-volatile content, percent

A = Mass of dish, g

B = Mass of dish and wet curing compound specimen, g


C = Mass of dish and dried specimen, after heating, g.

6.4 REPORTING OF RESULTS

The report shall include the non-volatile content of the curing compound to the nearest 0.1 percent.

ANNEXE D – Fiches techniques des granulats


Fiche technique du granulat fin



LABORATOIRE : Laboratoire St-Gabriel, 1811 chemin St-Cléophas, St-Gabriel-De-Brandon, Qc, J0K 1N0
SITE : 3530 Lafarge Sablière St-Gabriel-De-Brandon
1811 chemin St-Cléophas, St-Gabriel-De-Brandon, Qc, J0K 1N0

PRODUIT : 9071 SG,SABLE À BÉTON
RÉSERVE : 1-2017

FICHE TECHNIQUE LAFARGE GRANULAT QUÉBEC



Intertek
Système Qualité ISO 9001:2015

Superviseur Qualité

Stephane Brunet
stephane.brunet@lafargeholdcm.com
(514)923-0109

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE			RÉSULTATS DES ESSAIS PHYSIQUES			
NORME :	IDENTIFIANT DE LA NORME		RÉSULTATS	SPEC	RÉALISÉ PAR	DATE
SPEC :	MOYENNE	FUSEAU	E-TYPE			
TAMIS						
300			CSA A23.2-1A ÉCHANTILLONNAGE		Lafarge Gran. OC	15 Mars 2018
250			CSA A23.2-2A ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE		Lafarge Gran. OC	15 Mars 2018
200			CSA A23.2-3A MOTTS D'ARGILE	0.17%	Lafarge Gran. OC	15 Mars 2018
150			CSA A23.2-4A PARTICULES LÉGÈRES	0.00%	Englobe	15 Mars 2018
112			CSA A23.2-5A FENTE AU 80µm	2.4%	Lafarge Gran. OC	15 Mars 2018
80			CSA A23.2-6A DENSITÉ GRANULAT FIN (BRUT)	2.689	Englobe	15 Mars 2018
56			CSA A23.2-6A DENSITÉ GRANULAT FIN (SSS)	2.705	Englobe	15 Mars 2018
40			CSA A23.2-6A DENSITÉ GRANULAT FIN (APP)	2.731	Englobe	15 Mars 2018
31.5			CSA A23.2-6A ABSORPTION GRANULAT FIN	0.55	Englobe	15 Mars 2018
28			CSA A23.2-7A INDICE COLORIMÉTRIQUE	1	Lafarge Gran. OC	15 Mars 2018
20			CSA A23.2-9A MGSO4	2.09%	Englobe	15 Mars 2018
14			CSA A23.2-10A MASSE VOLUMIQUE (NON-TASSÉE)	1497 kg/m³	Lafarge Gran. OC	15 Mars 2018
10			CSA A23.2-14A RÉACTION ALCAÏS-GRANULATS	1735 kg/m³	Lafarge Gran. OC	15 Mars 2018
5			CSA A23.2-23A MICRO DEVAL GRANULAT FIN	0.007%	Lafarge CGB	19 Janv 2017
2.5			LC 21-080 FRIABILITÉ DES GRANULATS FINS	8.0%	Lafarge Gran. OC	15 Mars 2018
1.25			LC 21-101 MICRO DEVAL GRANULATS FINS	20.2%	Lafarge Gran. OC	15 Mars 2018
630			CSA A23.2-25A RÉACTION ALCAÏS-SILICE	17.5%	Lafarge Gran. OC	15 Mars 2018
315			LC 21-065 DENSITÉ GRANULATS FINS (BRUT)	0.08%	Lafarge CGB	06 Déc 2017
160			LC 21-065 DENSITÉ GRANULATS FINS (SSS)	2.696	Englobe	15 Mars 2018
80			LC 21-067 DENSITÉ GRANULATS (APP)	2.711	Englobe	15 Mars 2018
Module de finesse CSA A23.1			LC 21-065 ABSORPTION GRANULATS FINS	2.734	Englobe	15 Mars 2018
	2.56			0.52		

Préparé par : Sylvain Boisvert
sylvain.boisvert@lafargeholdcm.com
(514)606-1400

Technicien Qualité

Approuvé par :

Fiche technique du gros granulat





FICHE TECHNIQUE DES GRANULATS (COMPILATION QUALITATIVE)


Type de matériaux :	Pierre concassée		Calibre:		5-14 mm		Date:		19 avr. 2017										
Provenance :	Sables L.G.		Classe granululaire:				Usages prévus:												
	St-Hippolyte, Québec		Classement :		1A														
Granulométrie(CSA A23.2-2A)																			
Saison 2017	Nombre d'éch.	% passant en mm										% passant en um							
		112	80	56	40	31.5	28	20	16	14	12.5	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80
	3							100		97		69	11	4					1.3
Norme	Limite inf						100			90		45	0	0					0.0
5-14 mm	Limite sup						100			100		75	15	5					1.5
Caractéristiques intrinsèques		Norme d'essai		Résultats		Exigences		Date		Effectué par									
Micro-Deval (MD) (%) (Grade D)		LC 21-070		5.7		≤15%		19 04 17		GHD, montreal									
Micro-Deval (MD) (%)		CSAA23.2-29A		2.9		≤14		19 04 17		GHD, montreal									
Los Angeles (LA) (%) (Grade C1)		LC 21-400		23.5		≤ 35%		19 04 17		GHD, montreal									
Los Angeles (LA) (%) (Grade C)		CSA A23.2-16A		23.3		≤50		19 04 17		GHD, montreal									
% de particules fracturées		LC 21-100		100		100		19 04 17		GHD, montreal									
Particule légère granulair		A23.2-4A		0		NA		19 04 17		GHD, montreal									
Caractéristiques fabrications		Norme d'essai		Résultats		Exigences		Date		Effectué par									
% de particules plates		LC 21-265/CSA A23.2-13A		16 / 13		≤25		19 04 17		GHD, montreal									
% de particules allongées		LC 21-265/CSA A23.2-13A		31 / 17		≤40		19 04 17		GHD, montreal									
Particules plates et allongées		LC 21-265/CSAA23.2-13A		4 / 2				19 04 17		GHD, montreal									
Caractéristiques complémentaires		Norme d'essai		Résultats		Exigences		Date		Effectué par									
*Mottes d' argiles et part friables (%)		CSA A23.2-3A		0.1		≤ 0,25		19 04 17		GHD, montreal									
Propreté (particules < 80 um) (%)		CSA A23.2-5A		1.3		< 1,5		19 04 17		Laboratoire central									
Densité relative Brute/ Séche/SSS		CSA A23.2-12A		2.78 / 2.74 / 2.50		NA		19 04 17		GHD, montreal									
Absorption (%)		CSA A23.2-12A		0.44		NA		19 04 17		GHD, montreal									
Perte au MgSO4 (%)		CSAA 23.2-9A		0.6		< 12		19 04 17		GHD, montreal									
Masse volumique tassée & non tassée		CSAA 23.2-10A		1633 / 1438		NA		19 04 17		GHD, montreal									
Potential de réactivité alcalis granulats		CAN-A23.2-25A		0.040		< 0,150		15 04 17		GHD, montreal									
Gel-Dégel granulats non confinés (%)		CSA A 23.2-24A		0.9		< 6		19 04 17		GHD, montreal									
Nombre pétrographique		NQ 2560-900		100				19 04 17		GHD, montreal									



ANNEXE E – Résultats et photos des essais de résistance à la fissuration interne


Liant GU

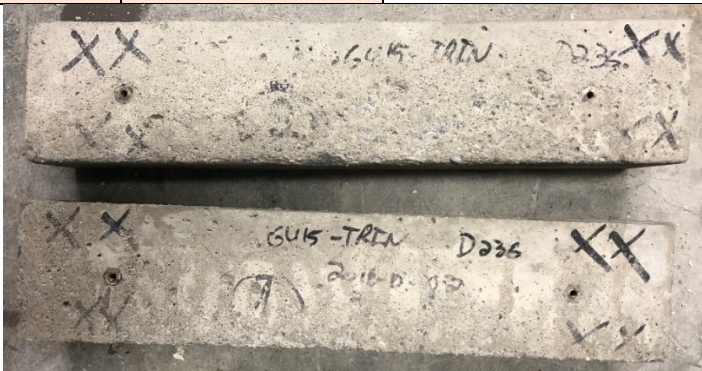
GUCH - ILE VERTE							
L-barre	261						
							
#1 GUCH - ILE VERTE #1				#2 GUCH - ILE VERTE #2			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0)²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0)²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
31	0.79	104	128	31	0.88	105	216
78	0.84	106	92	78	0.90	112	284
123	0.77	107	108	123	0.88	111	272
155	0.84	108	104	155	0.96	111	312
187	0.84	105	132	187	0.92	111	388
211	0.75	106	144	211	0.84	110	460
241	0.82	105	160	241	0.81	110	484
272	0.77	104	144	272	0.84	110	464
321	0.77	105	156	321	0.86	111	472


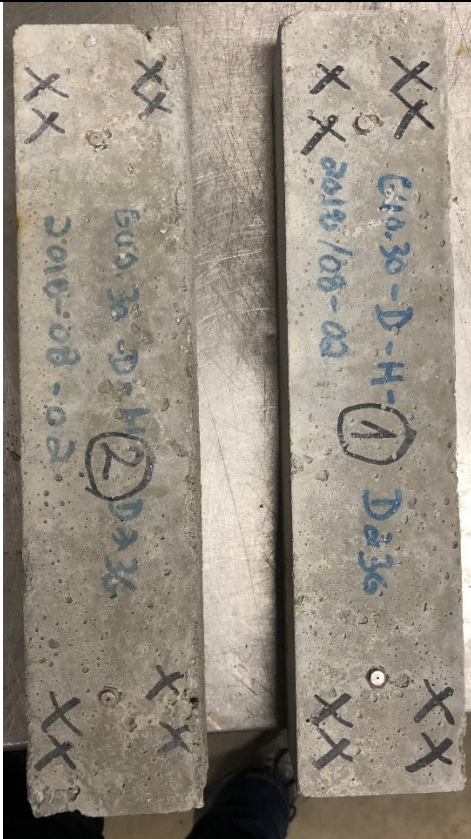
GUCH15 - ILE VERTE							
L-barre	445						
#1 GUCH15 - ILE VERTE #1				#2 GUCH15 - ILE VERTE #2			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
31	0.33	102	280	31	0.38	101	104
78	0.54	106	488	78	0.61	102	332
123	0.52	103	524	123	0.61	100	388
155	0.54	103	720	155	0.76	101	544
187	0.68	102	884	187	0.78	101	732
211	0.66	101	1044	211	0.78	100	844
241	0.68	96	1096	241	0.78	95	940
272	0.68	96	1244	272	0.78	91	1036
321	0.68	96	1244	321	0.71	92	1048


GUCH15-0.32-ÉTÉ17			
			
L-barre	470	Moyenne poutre 1 et 2	
Sec			
GUCH15-0.32-ÉTÉ17 Sec			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0)²	Déformation
0	0.00	100	0
46	0.79	99	279
91	0.98	99	399
137	0.95	100	339
185	0.46	100	413
236	-0.36	99	449
323	-1.90	105	641



GUCH15-0.32-AUT17							
L-barre	509	Poutre 1					
							
Sec GUCH15-0.32-AUT17 Sec				Hum GUCH15-0.32-AUT17 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
45	0.96	102	230	45	0.79	95	414
90	0.91	103	312	90	-0.03	79	1412
133	0.75	103	358	133	-1.66	37	3726
176	0.66	102	388				
219	0.55	102	464				
247	0.46	102	470				
301	-0.11	101	750				



GURM15-0.32-F			
L-barre	399	Poutre 1	
			
Sec GURM15-0.32-F Sec			
Nb cycle	Variation de la masse	$(V_t/V_0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0
23	0.36	97	218
70	0.62	93	396
98	0.66	78	358
126	-0.31	69	838
155	-1.33	0	936
188	-1.64		982
211	-4.55		988
234	-6.91		2176

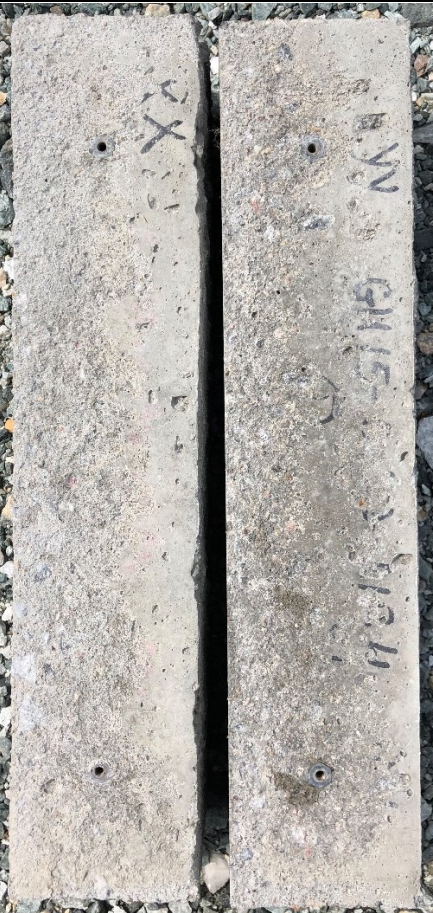

GUCH15-0.32-TRIN			
L-barre	378		
			
Sec GUCH15-0.32-TRIN Sec			
Nb cycle	Variation de la masse	$(V_t/V_0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0
48	0.47	97	358
127	0.45	96	388
172	0.50	98	424
207	0.49	98	382
244	0.47	99	392
282	0.46	100	398
341	0.54	95	622

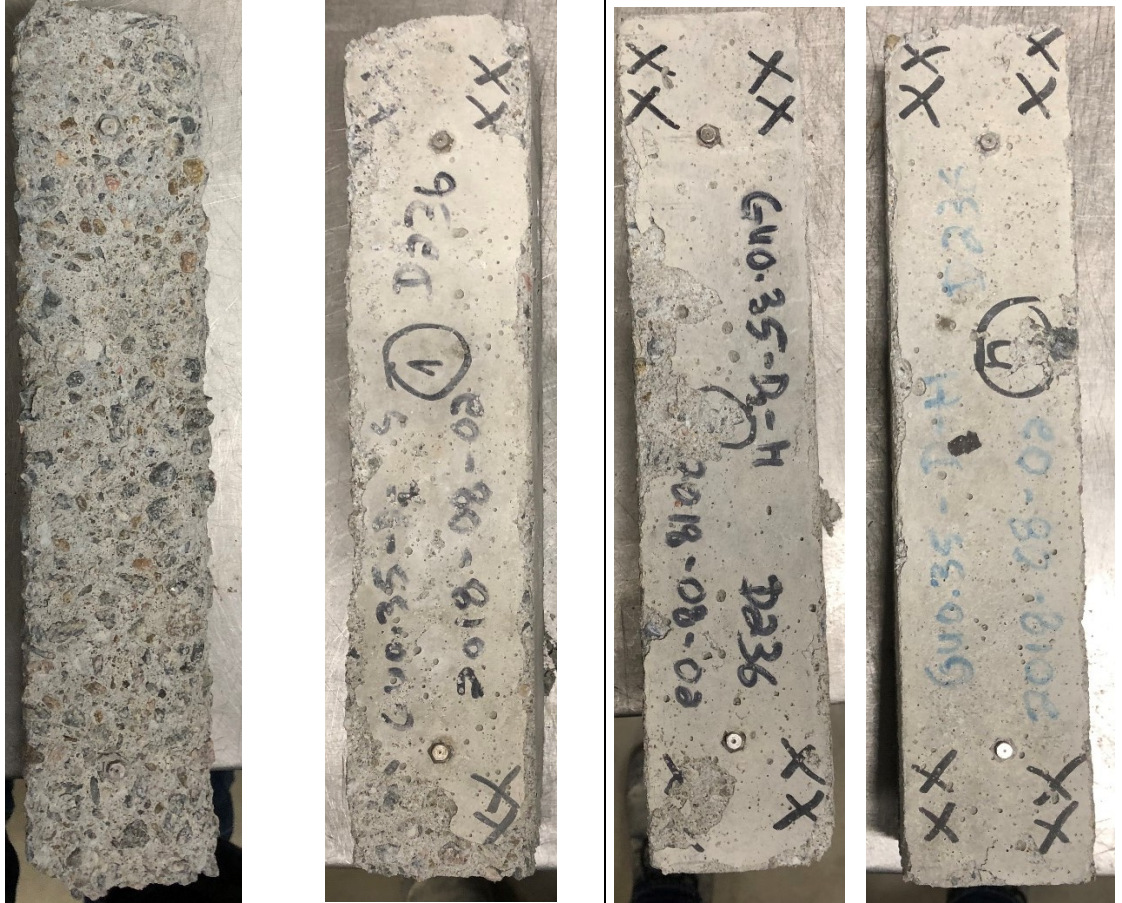
GU15-0.30-XDEF							
L-barre	611	Moyenne poutre 1 et 2					
							
Sec GU15-0.30-XDEF Sec				Hum GU15-0.30-XDEF Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
44	0.68	97	202	44	0.26	96	284
75	0.89	98	170	75	0.55	99	246
125	0.66	95	650	125	0.41	96	686
139	0.65	81	592	139	0.47	82	596
160	0.67	80	550	160	0.53	84	540
178	0.67	75	516	178	0.55	80	490
198	0.71	84	634	198	0.65	96	546
214	0.71	83	634	214	0.66	96	544
234	0.67	84	598	234	0.66	96	520
288	0.70	88	572	288	0.68	96	512
348	0.18	84	690	348	0.70	98	512

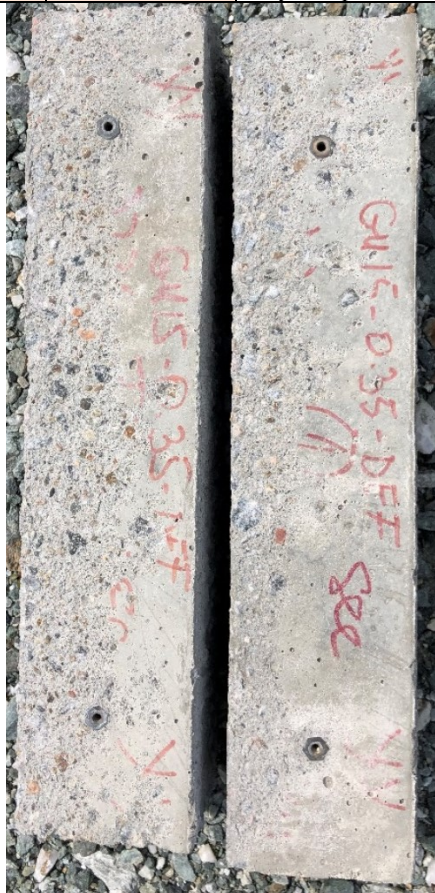
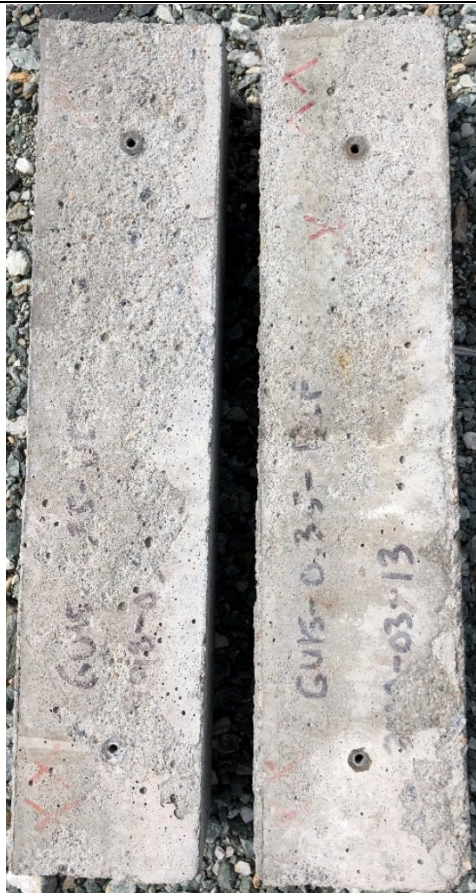
GU15-0.30-DEF							
L-barre	261	Poutre 1					
				Photo non-disponible			
Sec GU15-0.30-DEF Sec				Hum GU15-0.30-DEF Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	$(V_t/V_0)^2$	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	$(V_t/V_0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
29	0.76	100	336	29	0.27	98	276
60	0.82	100	336	60	0.45	98	276
107	0.78	100	332	107	0.57	98	280
152	0.59	102	336	152	0.57	99	280
184	0.51	103	376	184	0.63	99	268
216	0.33	102	376	216	0.61	98	312
240	0.12	100	420	240	0.33	97	380
270	-0.02	100	392	270	0.31	97	388
301	-0.25	101	408	301	0.00	98	376



GU15-0.30-AIR0							
L-barre	302	Poutre 1					
							
Sec GU15-0.30-AIR0 Sec				Hum GU15-0.30-AIR0 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
30	0.75	99	12	30	0.22	97	20
59	0.79	98	268	59	0.45	95	180
90	0.67	95	308	90	0.53	96	208
137	0.49	95	368	137	0.57	96	264
182	0.16	98	276	182	0.41	95	240
214	0.14	98	412	214	0.28	95	308
246	-0.24	95	424	246	0.10	95	308
270	-0.42	91	444	270	-0.04	94	368
300	-0.49	94	424	300	-0.22	95	364


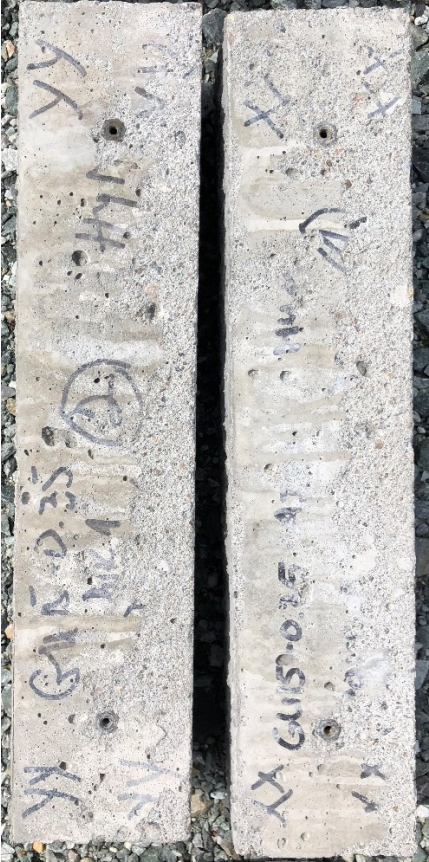
GU15-0.30-AIR1							
L-barre	176	Poutre 1					
							
Sec GU15-0.30-AIR1 Sec				Hum GU15-0.30-AIR1 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0	0	0	100	0
29	0.77	99	236	29	0.23	98	100
60	0.92	100	208	60	0.38	98	144
107	0.86	100	224	107	0.38	98	208
152	0.79	101	248	152	0.48	97	172
184	0.63	102	304	184	0.56	97	176
216	0.46	101	300	216	0.56	96	192
240	0.29	101	372	240	0.54	96	216
270	0.19	101	352	270	0.54	96	204
301	-0.02	101	336	301	0.40	97	216

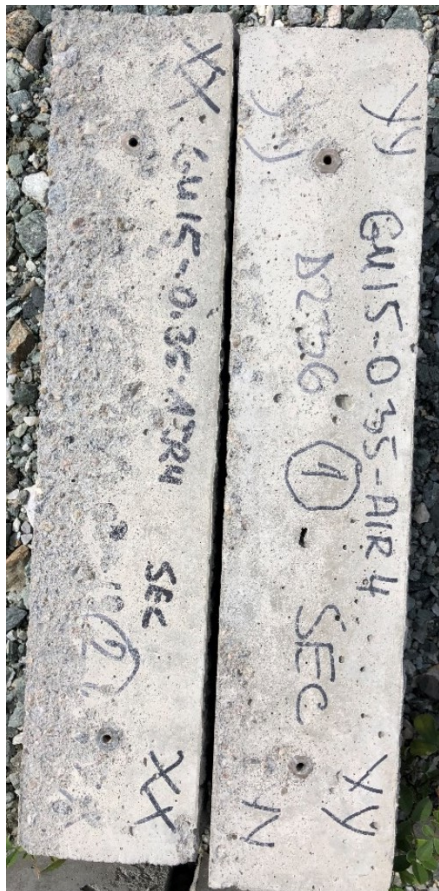
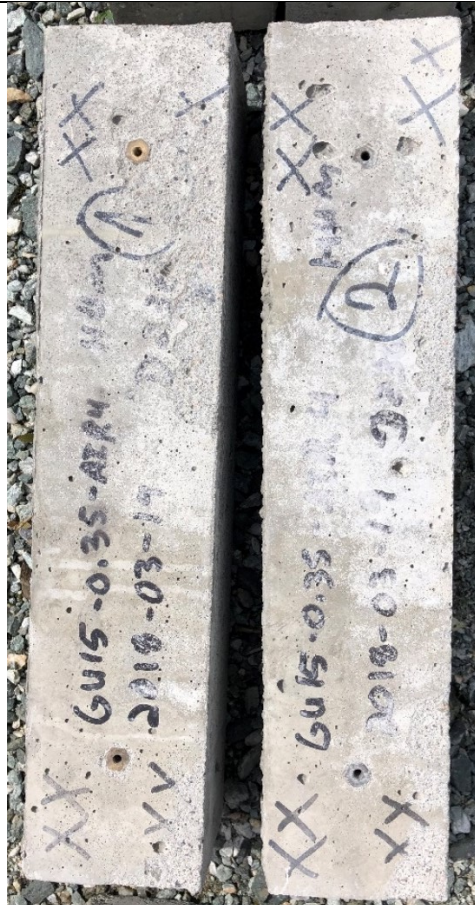
GU15-0.30-AIR4							
L-barre	161	Moyenne poutre 1 et 2					
							
Sec GU15-0.30-AIR4 Sec				Hum GU15-0.30-AIR4 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0	0	0	100	0
25	0.50	97	206	25	0.15	98	80
71	0.78	98	206	71	0.29	98	12
91	0.90	97	296	91	0.54	98	186
132	0.71	96	334	132	0.49	96	248
165	0.65	96	358	165	0.48	98	268
212	0.57	96	354	212	0.47	98	258
255	0.39	99	388	255	0.50	97	266
310	0.23	98	366	310	0.50	98	264


GU15-0.35-XDEF			
L-barre	572	Moyenne poutre 1 et 2	
			
Sec			
GU15-0.35-XDEF Sec			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0
44	0.56	87	242
75	-0.37	88	280
125	-1.74	0	670
139	-2.10		652
160	-2.67		620
178	-2.99		626
198	-3.13		780
214	-3.31		804
234	-3.47		766
288	-4.24		770
348	-6.07		818
Hum			
GU15-0.35-XDEF Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0	100	0
44	0.47	98	204
75	0.65	98	244
125	0.11	97	656
139	0.56	96	570
160	0.56	96	546
178	0.60	96	526
198	0.60	95	656
214	0.60	96	656
234	0.63	95	576
288	0.60	98	544
348	0.14	90	630


GU15-0.35-DEF							
L-barre	328	Moyenne poutre 1 et 2					
							
Sec				Hum			
GU15-0.35-DEF Sec				GU15-0.35-DEF Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0	100	0
25	0.88	98	224	25	0.27	97	188
71	1.13	100	222	71	0.51	99	134
91	1.23	100	310	91	0.74	99	240
132	0.93	100	304	132	0.65	100	256
165	0.81	103	308	165	0.69	100	290
212	0.53	103	306	212	0.70	100	276
255	0.19	103	306	255	0.64	101	252
310	-0.13	103	320	310	0.55	101	246


GU15-0.35-AIR0							
L-barre	254	Poutre 1					
							
Sec GU15-0.35-AIR0 Sec				Hum GU15-0.35-AIR0 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0	100	0
30	1.14	99	0	30	0.41	98	0
59	1.30	95	240	59	0.65	95	200
90	1.01	95	328	90	0.80	95	204
137	0.60	93	332	137	0.92	93	244
182	-0.10	94	388	182	0.67	94	212
214	-0.21	96	400	214	0.57	94	272
246	-0.85	97	396	246	-0.02	93	324
270	-1.10	96	436	270	-0.41	91	340
300	-1.41	97	444	300	-1.16	91	324

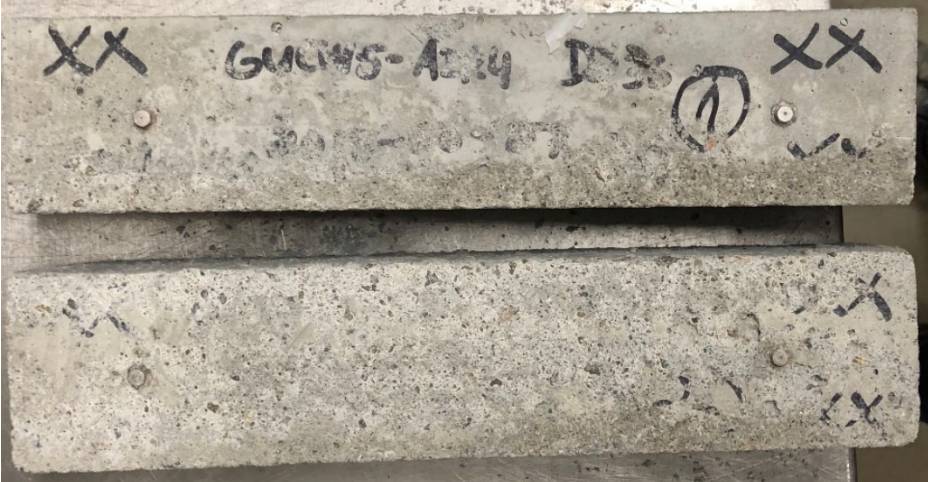
GU15-0.35-AIR1							
L-barre	191	Moyenne poutre 1 et 2					
							
Sec GU15-0.35-AIR1 Sec				Hum GU15-0.35-AIR1 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0	0	0	100	0
46	1.14	99	54	46	0.52	99	42
66	1.32	101	300	66	0.75	99	186
107	1.15	98	346	107	0.64	98	214
140	1.11	100	392	140	0.66	98	252
187	1.04	100	346	187	0.66	99	230
230	0.86	100	348	230	0.66	99	222
285	0.74	100	344	285	0.56	99	230
328	0.55	101	190	328	0.41	101	140

GU15-0.35-AIR4							
L-barre	166	Moyenne poutre 1 et 2					
							
Sec				Hum			
GU15-0.35-AIR4 Sec				GU15-0.35-AIR4 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0	100	0
46	1.27	100	78	46	0.62	100	108
66	1.47	102	268	66	0.74	101	252
107	1.39	101	312	107	0.73	100	288
140	1.39	101	346	140	0.76	100	300
187	1.35	101	352	187	0.76	100	288
230	1.27	101	372	230	0.76	100	292
285	1.13	102	398	285	0.73	100	352
328	1.07	100	316	328	0.74	100	254


GUCH15-DEF							
L-barre	565						
#1 GUCH15-DEF #1				#2 GUCH15-DEF #2			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0	100	0
27	0.65	93	248	27	0.6	96	224
55	1.06	74	556	55	1.0	73	452
83	1.49	27	2128	83	1.3	48	1416
112	-4.22	0	3548	112	-0.3	0	2708
145	-9.16		6040	145	-2.8		3380
168	-13.67		6072	168	-4.7		3676



GUCH15-AIR0							
L-barre	424						
#1 GUCH15-AIR0 #1				#2 GUCH15-AIR0 #2			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0)²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0)²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
27	0.50	98	112	27	0.50	98	212
55	0.70	96	136	55	0.70	97	116
83	0.80	76	244	83	0.80	75	304
112	0.80	0	752	112	0.80	53	624
145	-0.90		1052	145	-0.40	0	700
168	-1.90		1076	168	-1.20		656
191	-3.40		1368	191	-2.20		840
205	-4.80		1548	205	-3.40		940
226	-5.50		1596	226	-3.80		968
244	-7.0		1704	244	-4.4		1000
264	-7.4		1960	264	-4.7		1136
280	-7.8		1948	280	-4.9		1316
300	-8.5		1996	300	-5.2		1328

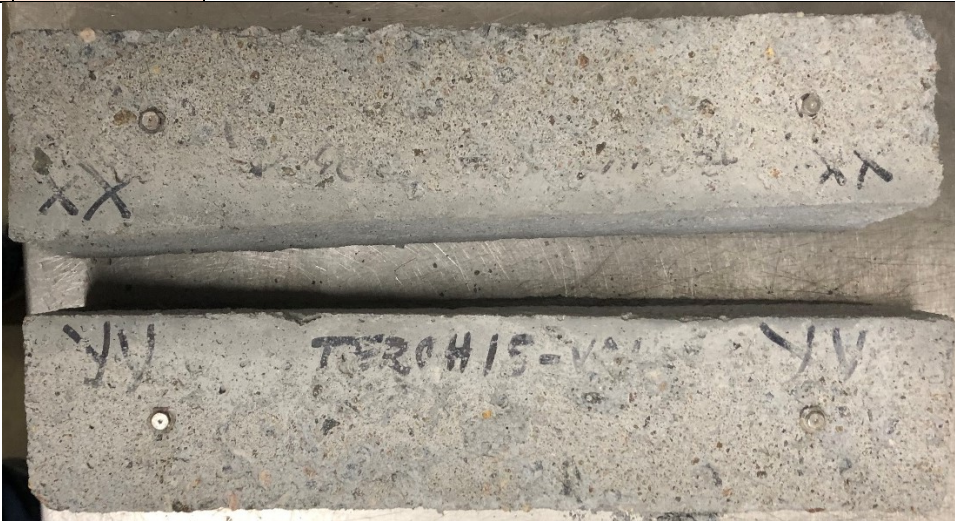
GUCH15-AIR1							
L-barre	354						
#1 GUCH15-AIR1 #1				#2 GUCH15-AIR1 #2			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0)²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0)²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
27	0.40	100	168	27	0.40	99	216
55	0.60	98	4	55	0.60	96	144
83	0.60	95	24	83	0.70	89	156
112	0.60	91	196	112	0.70	82	412
145	0.60	91	256	145	0.70	75	504
168	0.60	88	240	168	0.40	69	560
191	0.30	92	380	191	-0.80	0	780
205	0.10	74	452	205	-1.90		936
226	-0.10	80	456	226	-2.10		932
244	-0.54	71	456	244	-2.41		988
264	-0.54	77	568	264	-2.49		1116
280	-0.54	82	656	280	-2.69		1176
300	-0.34	82	656	300	-2.85		1176


GUCH15-AIR4							
L-barre	158						
#1 GUCH15-AIR4 #1				#2 GUCH15-AIR4 #2			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0)²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0)²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
27	0.50	96	168	27	0.39	97	148
55	0.52	98	8	55	0.47	97	0
83	0.54	97	28	83	0.52	98	8
112	0.61	97	120	112	0.54	98	104
145	0.59	97	28	145	0.54	99	4
168	0.59	96	64	168	0.41	98	-8
191	0.54	98	188	191	0.37	98	160
205	0.48	97	236	205	0.29	97	240
226	0.48	97	240	226	0.21	97	248
244	0.46	97	264	244	0.16	97	268
264	0.71	94	384	264	0.41	97	346
280	0.61	93	408	280	0.31	98	316
300	0.57	93	420	300	0.27	96	-1000



Liant ternaire


TERCH15-0.35-ÉTÉ17			
L-barre	386	Moyenne poutre 1, 2 et 3	
			
Hum			
TERCH15-0.35-ÉTÉ17 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0)²	Déformation
0	0.00	100	0
52	0.82	100	295
99	0.95	100	299
150	1.00	101	272
195	1.01	101	279
241	1.00	101	213
289	1.03	101	177
340	1.02	101	187



TERCH15-0.35-AUT17							
L-barre	463	Moyenne poutre 1 et 2					
							
Sec TERCH15-0.35-AUT17 Sec				Hum TERCH15-0.35-AUT17 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0	0	0	100	0
45	0.75	100	308	45	0.90	93	480
90	0.53	101	346	90	0.82	78	750
133	0.35	101	408	133	-0.22	69	894
176	0.13	100	466	176	-1.12	70	1052
219	0.03	99	540	219	-1.78	63	1214
247	0.02	99	540	247	-2.31	64	1260
301	-0.23	98	694	301	-3.49	64	1412


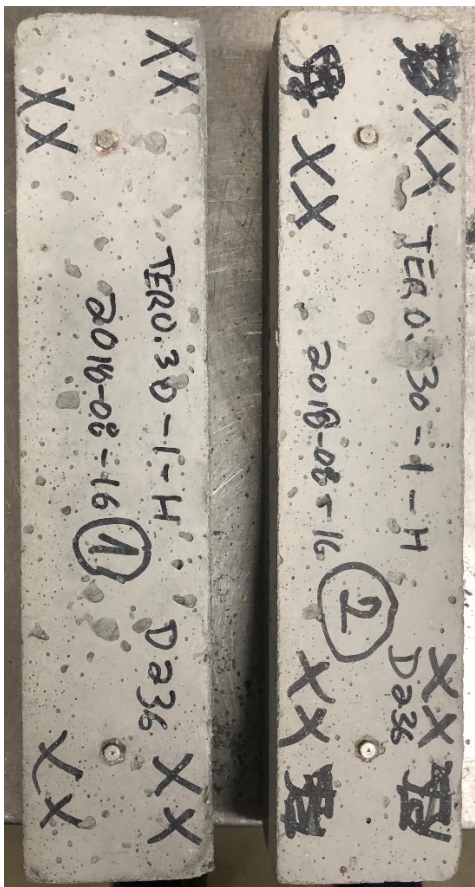
TERCH15-0.35-VAL							
L-barre	340	Poutre 1					
							
#1 TERCH15-0.35-VAL #1				#2 TERCH15-0.35-VAL #2			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
16	0.65	99	400	16	0.68	98	440
38	0.78	83	440	38	0.75	84	464
67	0.72	85	468	67	0.75	83	472
97	0.63	83	532	97	0.70	82	516
129	0.84	100	692	129	0.89	97	676
201	0.38	104	632	201	0.64	95	608
249	0.21	104	636	249	0.58	97	640
328	-0.19	104	760	328	0.25	101	712

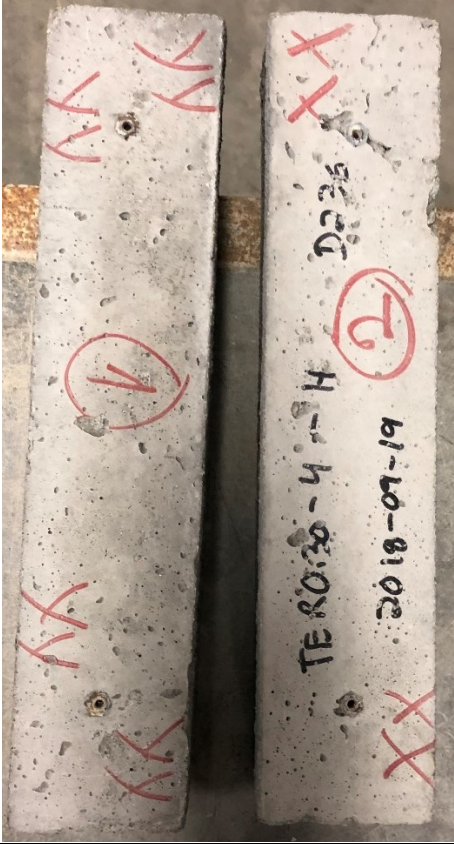
TER5CH-0.35			
L-barre	350	Moyenne poutre 1 et 2	
			
L'échantillon a été identifié GU5-CH, mais il s'agit du TER5-CH.			
Hum			
TER5CH-0.35 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0
24	0.00	101	48
47	0.01	101	308
94	0.00	100	342
122	0.01	100	276
150	-0.04	101	222
179	-0.06	101	242
212	-0.11	101	248
235	-0.11	102	228
258	-0.13	102	258
272	-0.12	98	322
293	-0.24	82	326
311	-0.25	88	358

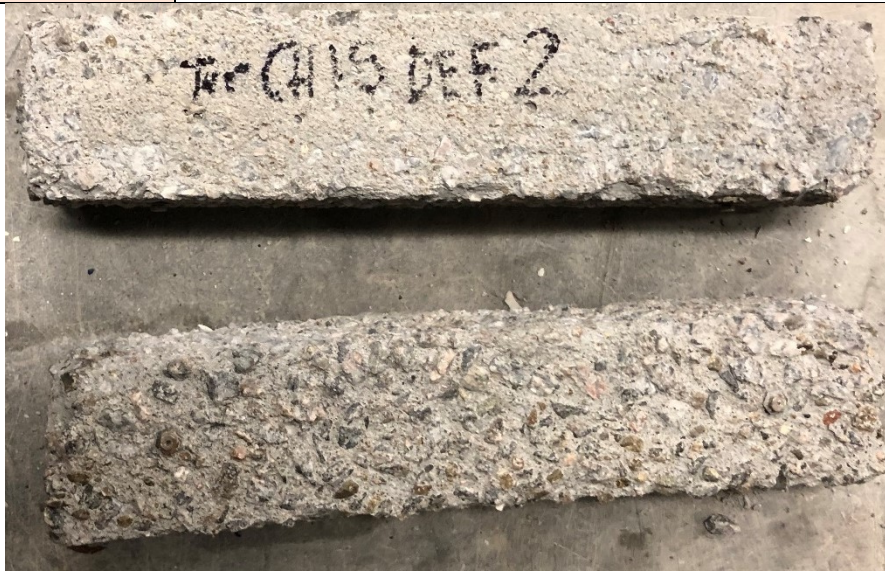
TER15-0.32-XDEF							
L-barre	557	Moyenne poutre 1 et 2					
							
Sec				Hum			
TER15-0.32-XDEF Sec				TER15-0.32-XDEF Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
36	0.88	97	378	36	0.25	98	352
71	0.48	59	506	71	0.37	77	396
125	-1.28	42	1194	125	0.39	80	426
165	-4.70	0	2554	165	0.52	72	456
214	-10.97		4546	214	0.78	75	643
				258	0.39	56	1332
				308	-0.81	0	2018


TER15-0.32-DEF							
L-barre	299	Moyenne poutre 1 et 2					
Photo non-disponible							
Sec TER15-0.32-DEF Sec				Hum TER15-0.32-DEF Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0	100	0
48	1.14	100	124	48	0.53	97	212
90	0.92	100	230	90	0.67	96	256
127	0.28	99	242	127	0.67	97	296
176	-0.44	101	282	176	0.60	95	280
221	-0.93	100	338	221	0.51	95	370
270	-1.68	100	350	270	0.37	95	346
329	-2.51	92	246	329	-0.72	73	188

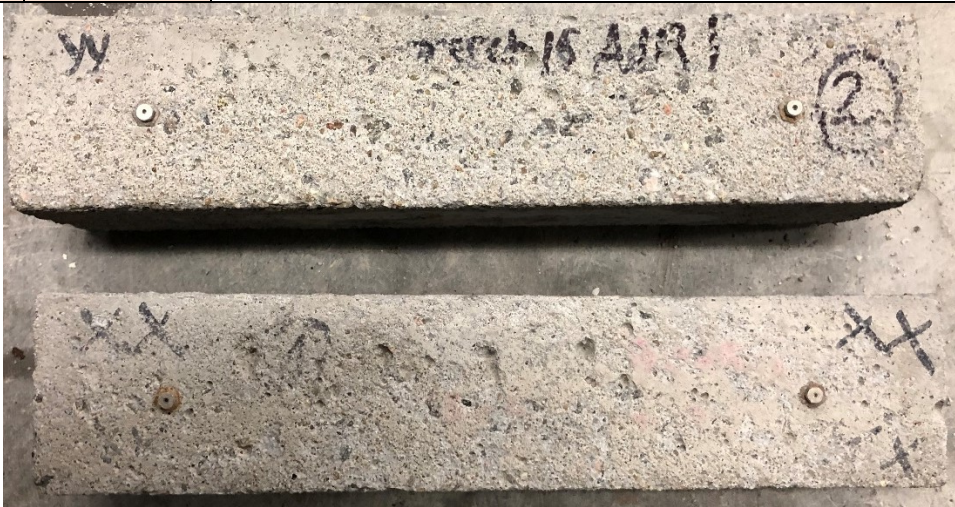
TER15-0.32-AIR0																																																																															
L-barre	266	Moyenne poutre 1 et 2																																																																													
																																																																															
<div> <div>Sec</div> <div>TER15-0.32-AIR0 Sec</div> <table> <tr> <th>Nb cycle</th> <th>Variation de la masse</th> <th>(Vt/V0)²</th> <th>Déformation</th> </tr> <tr><td>0</td><td>0.00</td><td>100</td><td>0</td></tr> <tr><td>48</td><td>0.96</td><td>97</td><td>138</td></tr> <tr><td>90</td><td>0.90</td><td>96</td><td>346</td></tr> <tr><td>127</td><td>0.60</td><td>93</td><td>410</td></tr> <tr><td>176</td><td>0.01</td><td>93</td><td>462</td></tr> <tr><td>221</td><td>-0.35</td><td>95</td><td>546</td></tr> <tr><td>270</td><td>-0.92</td><td>94</td><td>604</td></tr> <tr><td>329</td><td>-1.86</td><td>86</td><td>468</td></tr> </table> </div>				Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	0	0.00	100	0	48	0.96	97	138	90	0.90	96	346	127	0.60	93	410	176	0.01	93	462	221	-0.35	95	546	270	-0.92	94	604	329	-1.86	86	468	<div> <div>Hum</div> <div>TER15-0.32-AIR0 Hum</div> <table> <tr> <th>Nb cycle</th> <th>Variation de la masse</th> <th>(Vt/V0)²</th> <th>Déformation</th> </tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>100</td><td>0</td></tr> <tr><td>48</td><td>0.49</td><td>97</td><td>158</td></tr> <tr><td>90</td><td>0.60</td><td>96</td><td>220</td></tr> <tr><td>127</td><td>0.64</td><td>96</td><td>266</td></tr> <tr><td>176</td><td>0.48</td><td>96</td><td>272</td></tr> <tr><td>221</td><td>0.40</td><td>95</td><td>270</td></tr> <tr><td>270</td><td>0.35</td><td>95</td><td>272</td></tr> <tr><td>329</td><td>-0.18</td><td>88</td><td>186</td></tr> </table> </div>				Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	0	0	100	0	48	0.49	97	158	90	0.60	96	220	127	0.64	96	266	176	0.48	96	272	221	0.40	95	270	270	0.35	95	272	329	-0.18	88	186
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation																																																																												
0	0.00	100	0																																																																												
48	0.96	97	138																																																																												
90	0.90	96	346																																																																												
127	0.60	93	410																																																																												
176	0.01	93	462																																																																												
221	-0.35	95	546																																																																												
270	-0.92	94	604																																																																												
329	-1.86	86	468																																																																												
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation																																																																												
0	0	100	0																																																																												
48	0.49	97	158																																																																												
90	0.60	96	220																																																																												
127	0.64	96	266																																																																												
176	0.48	96	272																																																																												
221	0.40	95	270																																																																												
270	0.35	95	272																																																																												
329	-0.18	88	186																																																																												


TER15-0.32-AIR1							
L-barre	285	Moyenne poutre 1 et 2					
							
Sec TER15-0.32-AIR1 Sec				Hum TER15-0.32-AIR1 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	$(Vt/V0)^2$	Déformatio n
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
36	0.95	99	410	36	0.29	99	364
71	1.03	72	464	71	0.40	74	416
125	1.04	92	490	125	0.42	92	426
165	0.87	88	496	165	0.46	91	426
214	0.80	97	512	214	0.61	96	480
258	0.43	95	524	258	0.59	96	550
308	0.28	96	500	308	0.66	98	544

TER15-0.32-AIR4							
L-barre	229	Moyenne poutre 1 et 2					
Photo non-disponible							
Sec TER15-0.32-AIR4 Sec				Hum TER15-0.32-AIR4 Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	$(V_t/V_0)^2$	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	$(V_t/V_0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
50	0.81	95	22	50	0.23	98	44
104	0.99	96	40	104	0.54	99	52
164	0.82	95	152	164	0.50	98	224
209	0.78	98	196	209	0.54	96	254
244	0.72	98	160	244	0.54	96	194
281	0.66	99	88	281	0.54	97	198
319	0.64	100	74	319	0.48	98	224


TERCH15-DEF							
L-barre	676						
#1 TERCH15-DEF #1				#2 TERCH15-DEF #2			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
27	0.91	94	260	27	0.78	94	296
48	0.69	94	324	48	1.24	94	436
84	-2.98	0	344	84	-3.56	0	436
143	-6.07	0	320	143	-5.12	0	432
174	-7.37	0	648	174	-5.58	0	576
224	-7.37	0	1008	224	-6.14	0	724
259	-9.06	0	1164	259	-6.51	0	948
313	-9.97	0	1632	313	-6.97	0	1348

TERCH15-AIR0							
L-barre	413						
							
#1 TERCH15-AIR0 #1				#2 TERCH15-AIR0 #2			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
27	0.71	99	12	27	0.87	100	-24
48	0.81	99	8	48	0.87	100	4
84	0.81	100	100	84	0.77	98	100
143	0.56	99	144	143	0.75	96	148
174	0.50	96	140	174	0.54	96	176
224	0.08	75	412	224	0.25	96	564
246	-0.15	79	372	246	-0.02	79	544
275	-0.27	80	492	275	-0.31	76	716
305	-0.48	74	900	305	-0.50	65	808

TERCH15-AIR1							
L-barre	252						
#1 TERCH15-AIR1 #1				#2 TERCH15-AIR1 #2			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
27	0.63	99	12	27	0.68	99	220
48	0.73	98	96	48	0.78	99	256
84	0.73	102	140	84	0.72	101	280
143	0.67	98	212	143	0.27	99	328
174	0.59	99	284	174	0.04	100	368
224	0.44	99	472	224	-0.21	99	564
246	0.33	76	472	246	-0.32	78	564
275	0.25	88	472	275	-0.34	84	576
305	0.15	91	452	305	-0.44	88	576

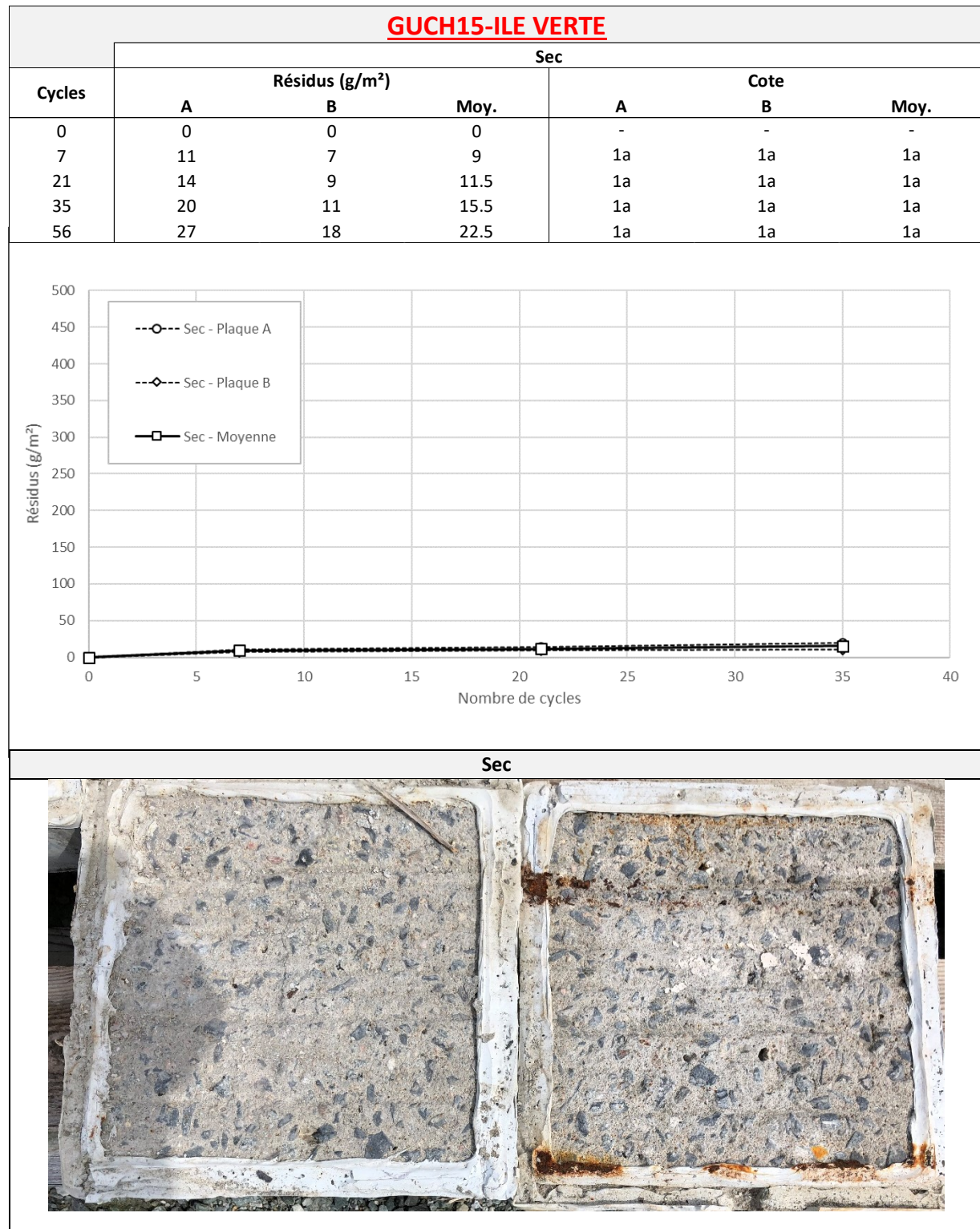
TERCH15-AIR4							
L-barre	146						
#1 TERCH15-AIR4 #1				#2 TERCH15-AIR4 #2			
Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation	Nb cycle	Variation de la masse	(Vt/V0) ²	Déformation
0	0.00	100	0	0	0.00	100	0
27	0.49	97	228	27	0.50	98	136
48	0.68	97	216	48	0.65	98	164
84	0.70	97	280	84	0.65	98	188
143	0.68	98	216	143	0.62	99	204
174	0.55	96	328	174	0.50	99	204
224	0.36	95	556	224	0.39	95	560
246	0.25	74	548	246	0.30	80	564
275	0.19	79	548	275	0.26	85	560
305	0.04	87	548	305	0.22	86	516

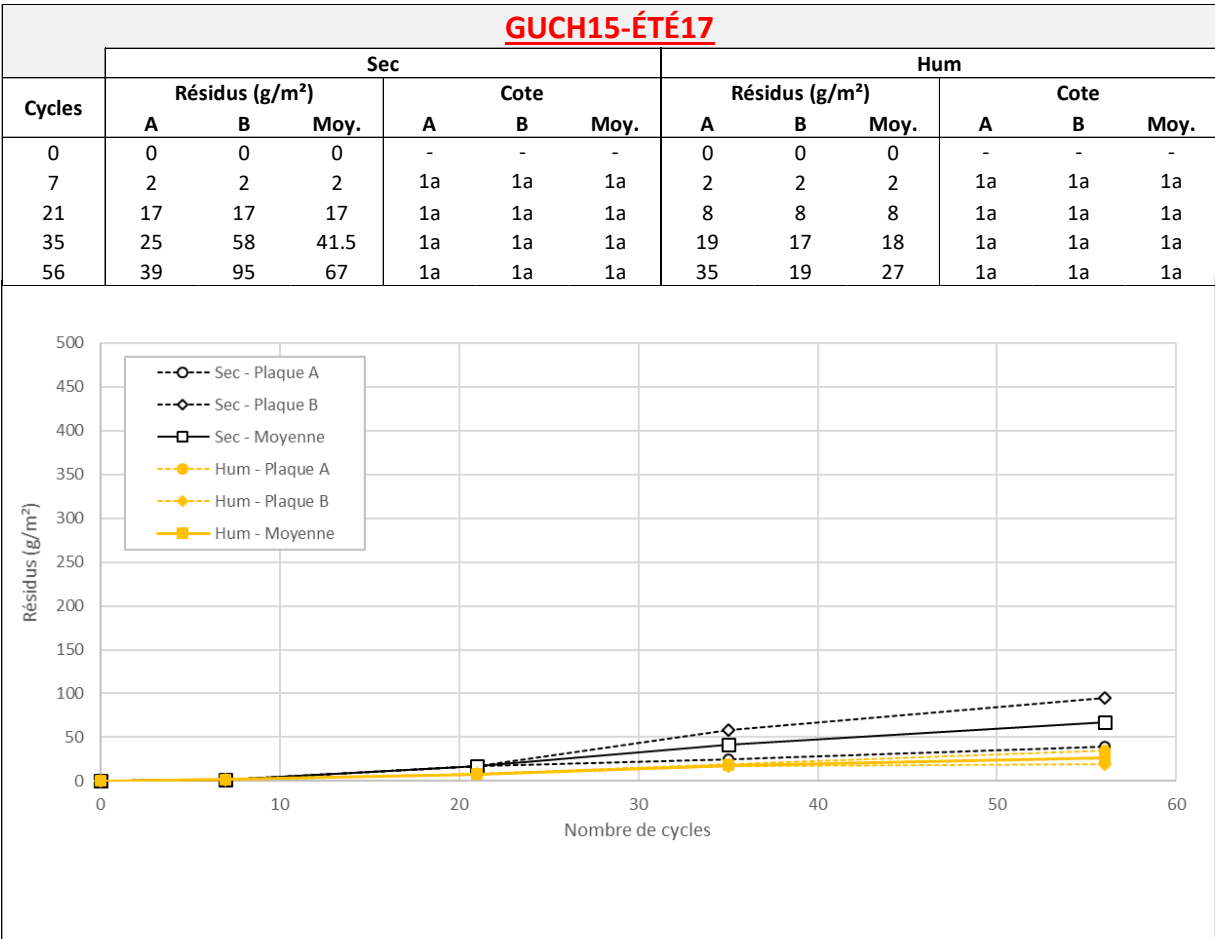
Liant RapidSet

RSCH15-HUM			
L-barre	474	Moyenne poutre 1 et 2	
			
Hum			
RSCH15-HUM Hum			
Nb cycle	Variation de la masse	$(V_t/V_0)^2$	Déformation
0	0.00	100	0
17	0.17	99	21
65	0.29	98	15
115	0.41	100	-7
168	0.44	100	45
215	0.49	100	92
252	0.28	94	127
296	0.29	92	129
327	0.31	92	143

ANNEXE F – Résultats et photos des essais d'écaillage

Liant GU



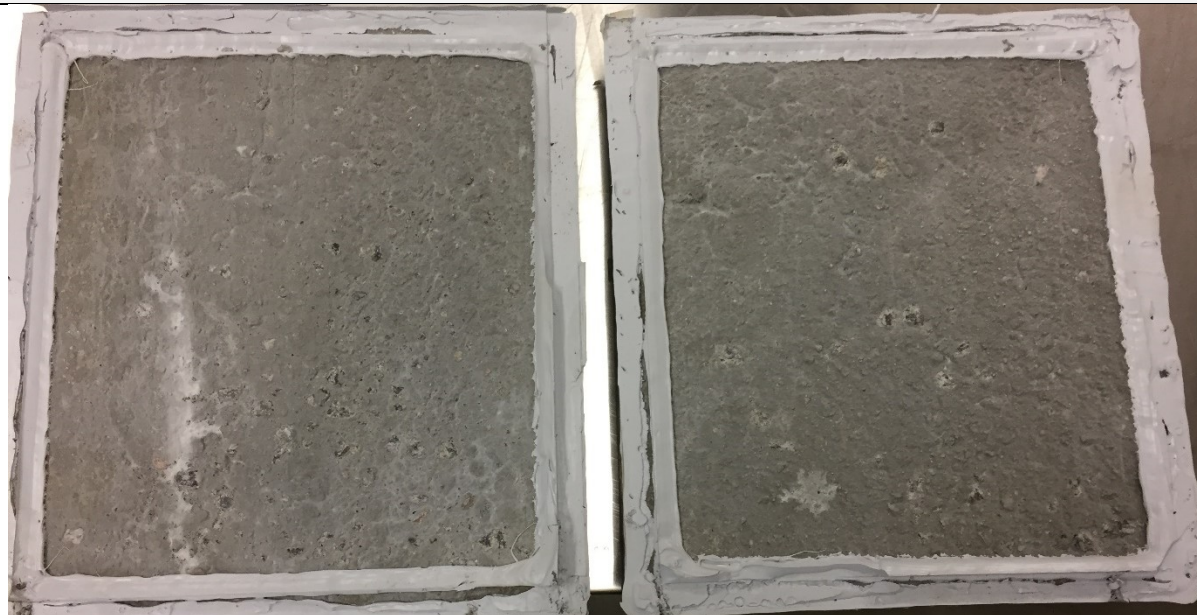


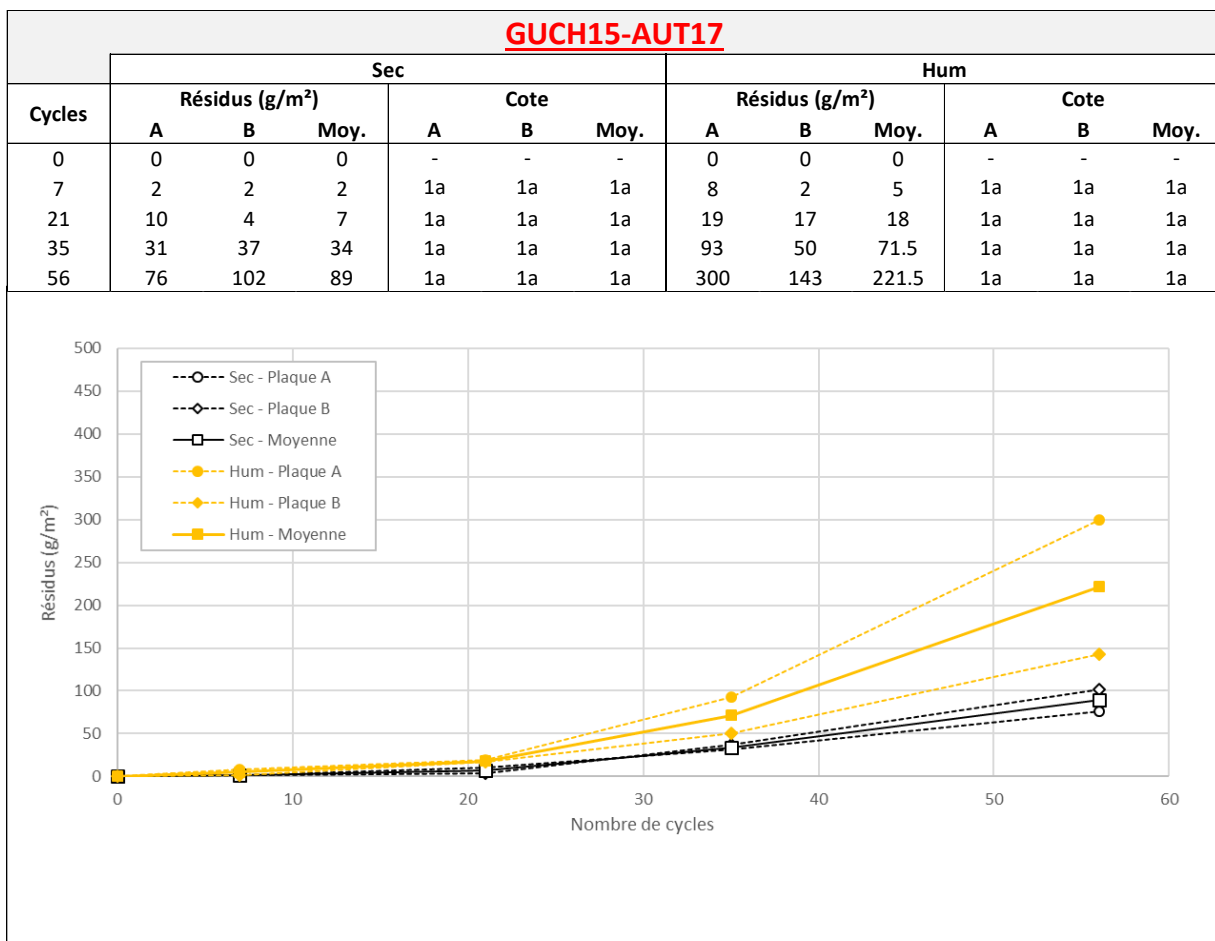
GUCH15-ÉTÉ17

Sec



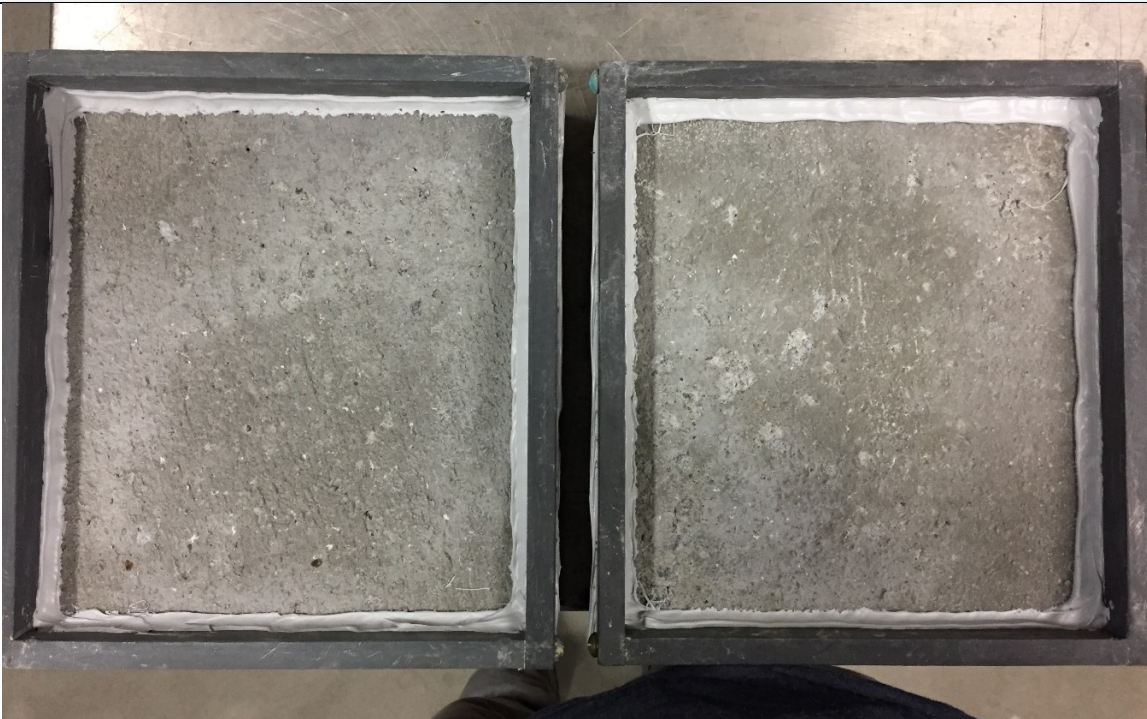
Hum



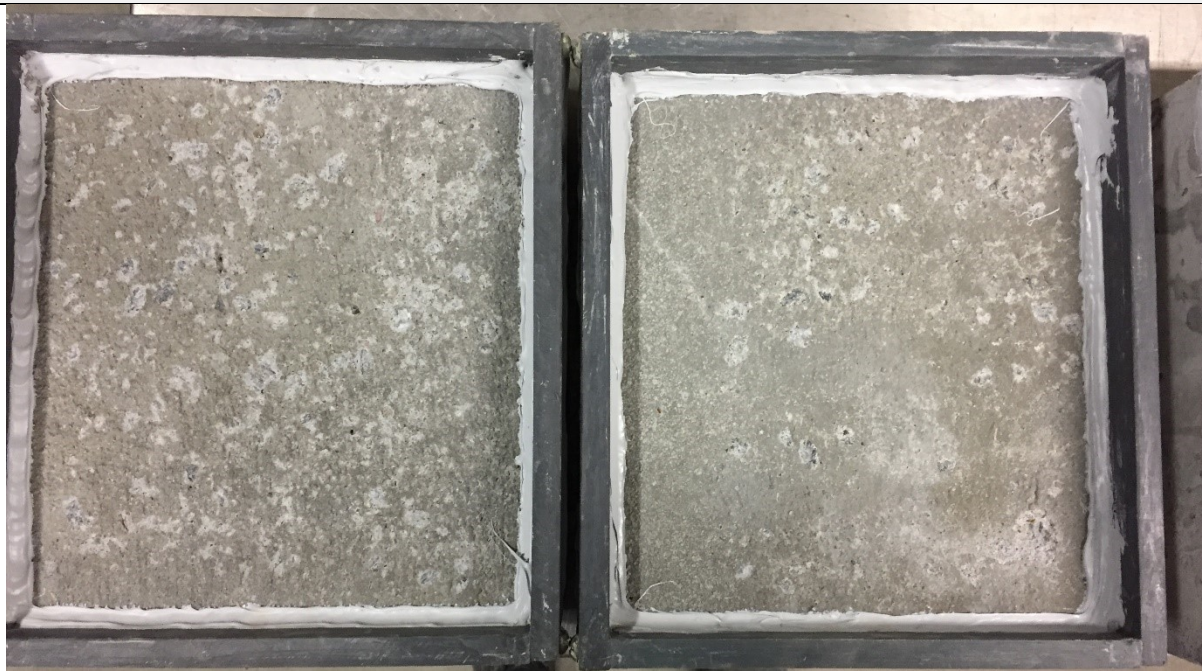


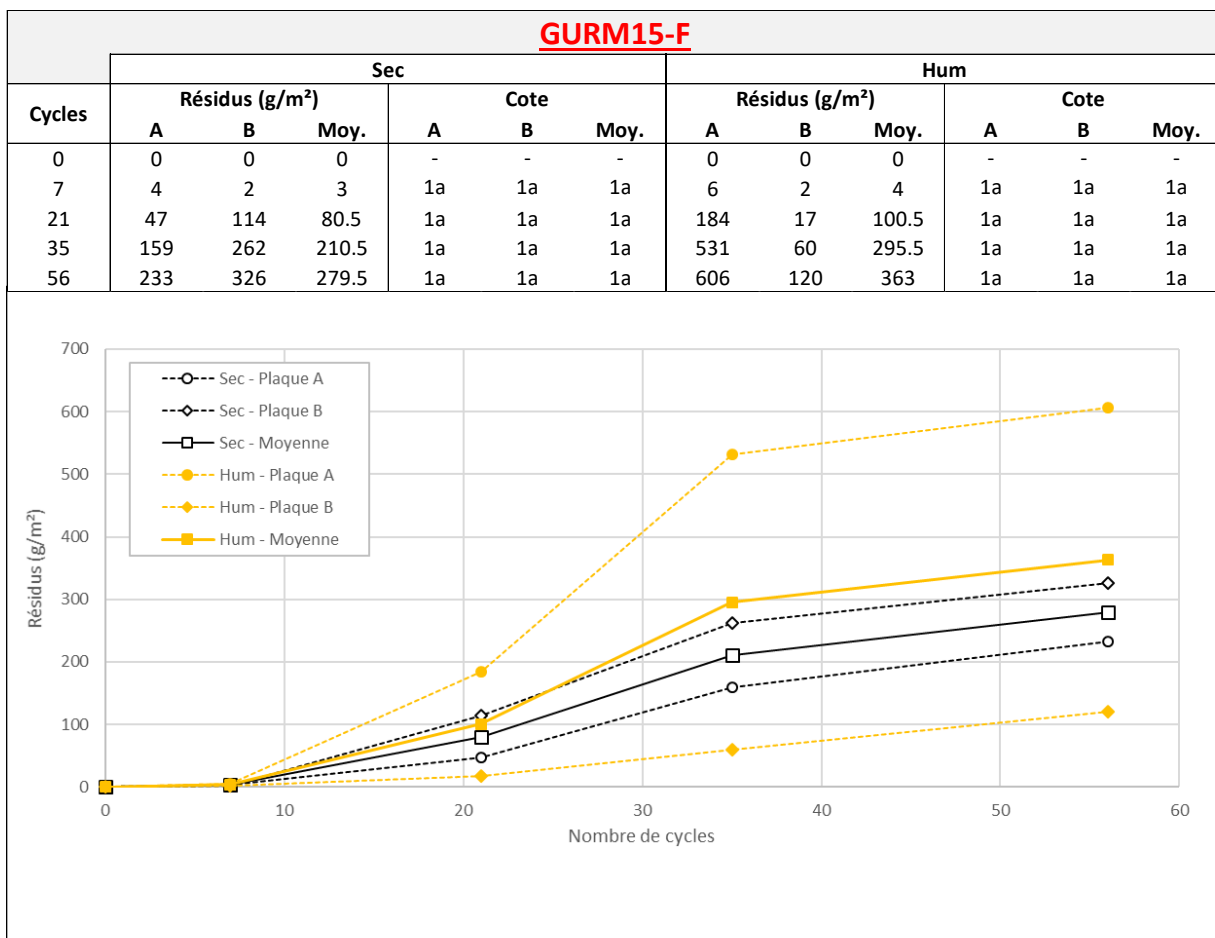
GUCH15-AUT17

Sec



Hum





GURM15-F

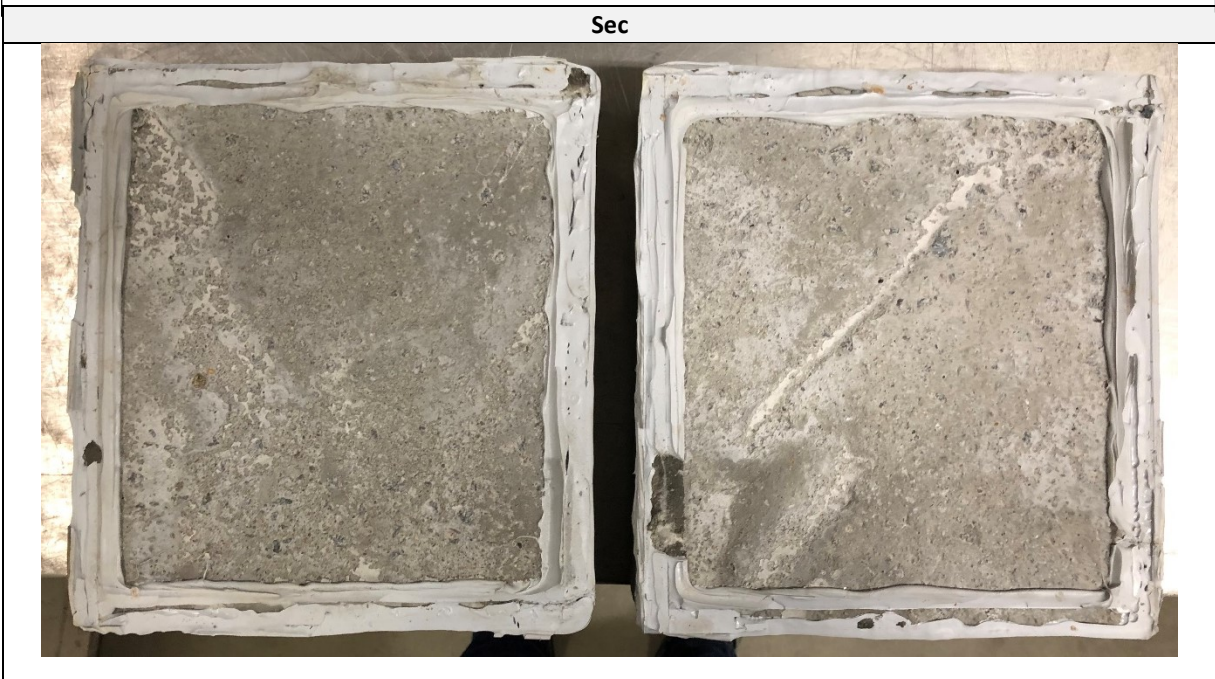
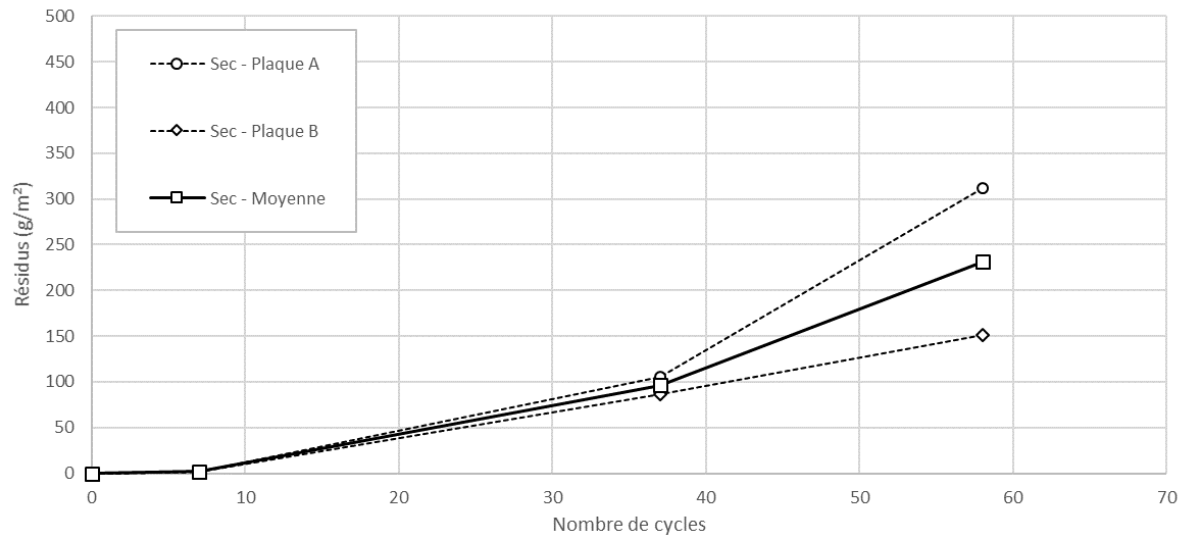
Sec

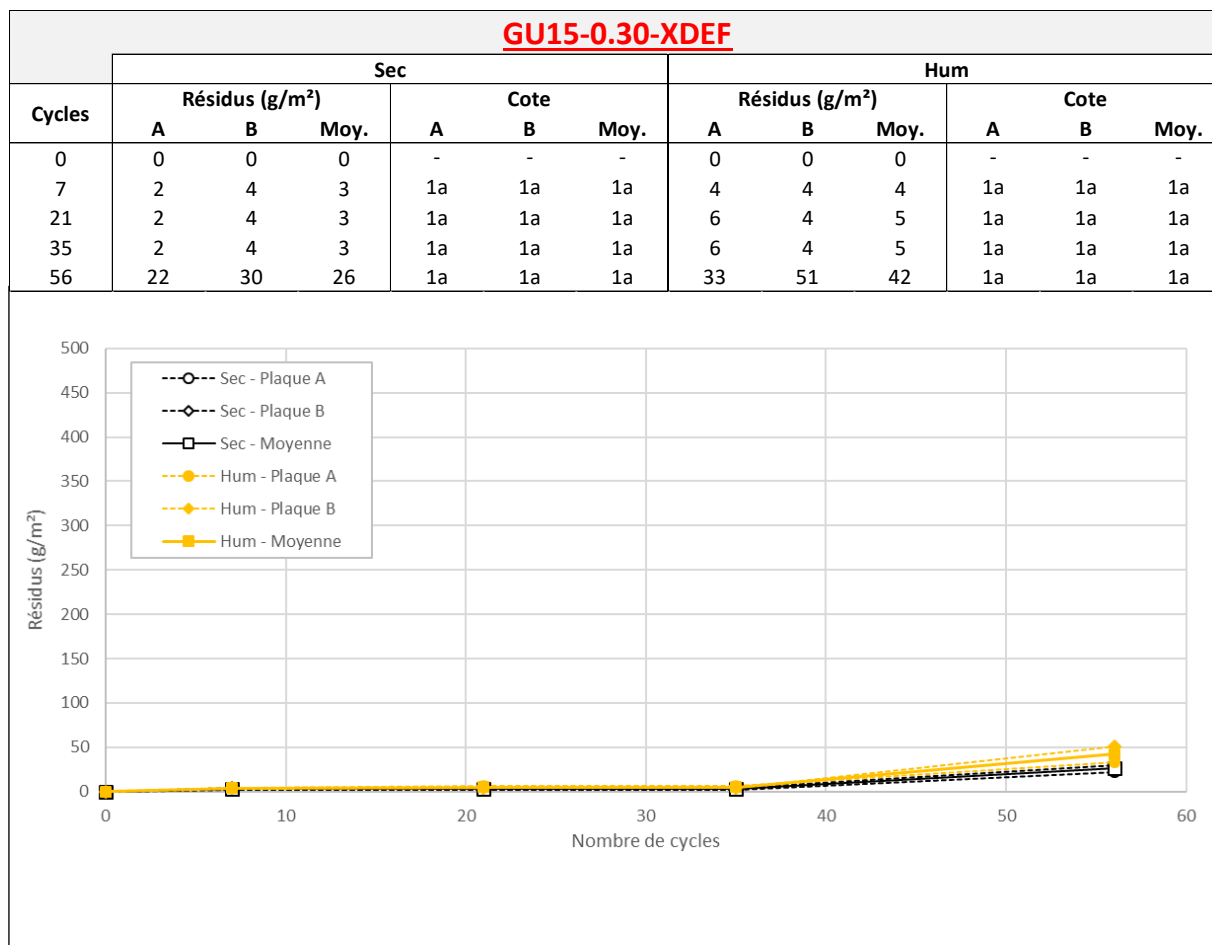


Hum



<u>GUCH15-TRIN</u>						
Cycles	Sec					
	Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	0	0	-	-	-
7	2	2	2	1a	1a	1a
37	105	87	96	1a	1a	1a
58	312	151	231.5	1a	1a	1a
-	-	-	-	-	-	-



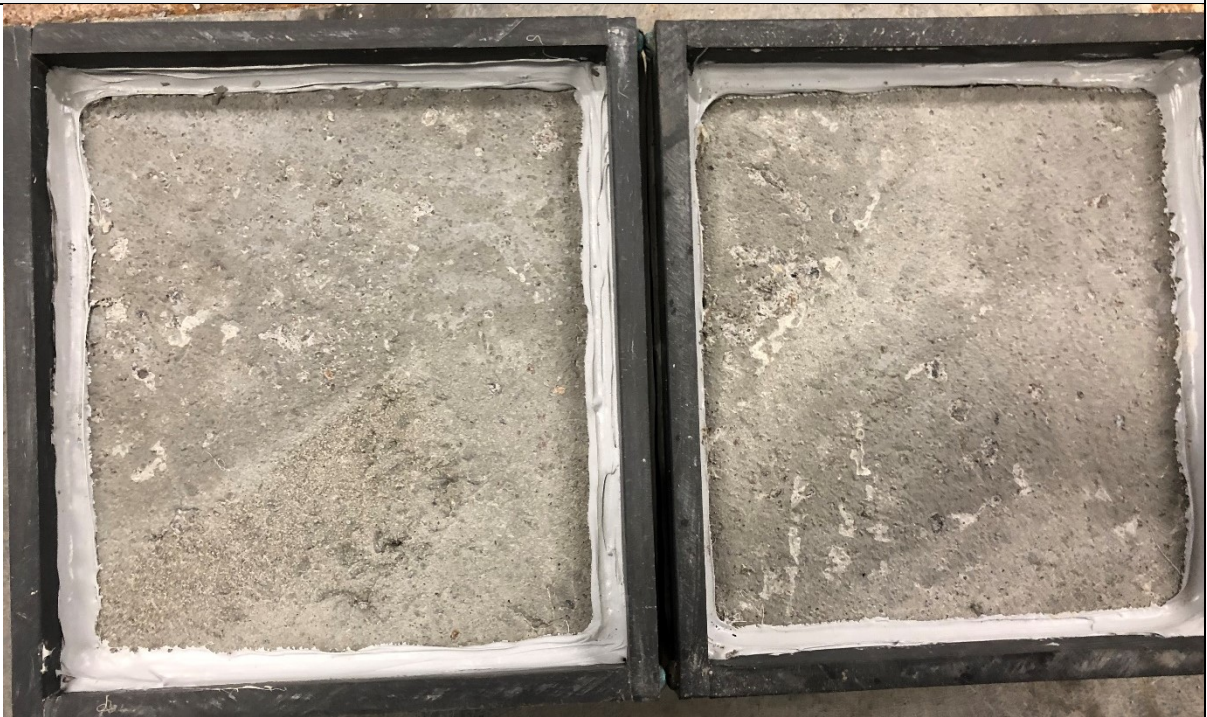


GU15-0.30-XDEF

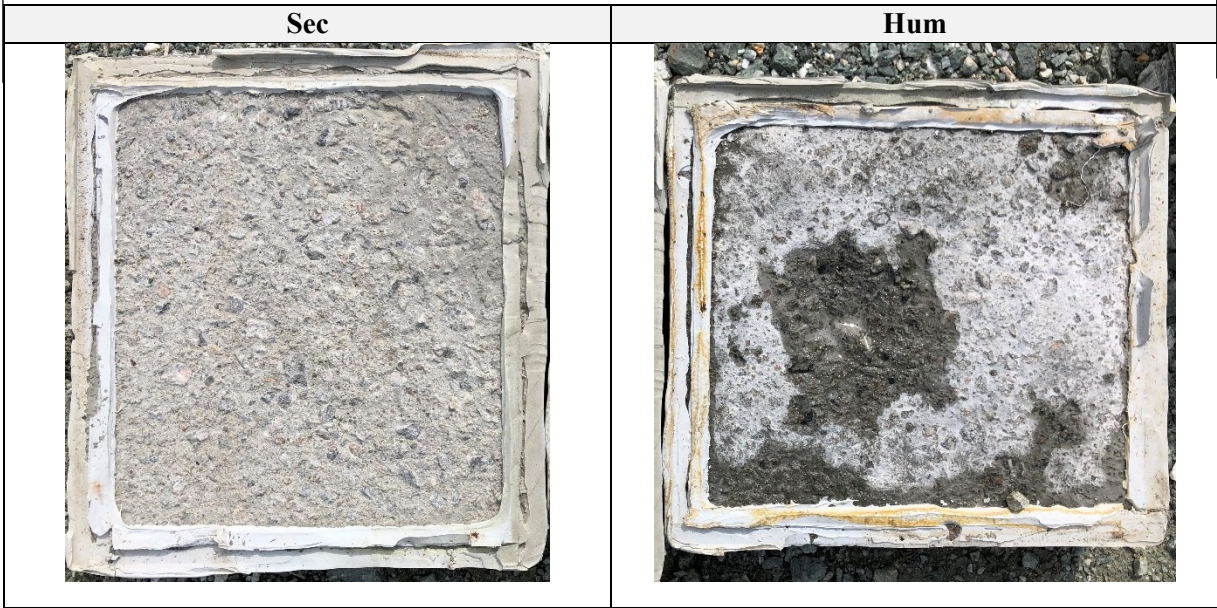
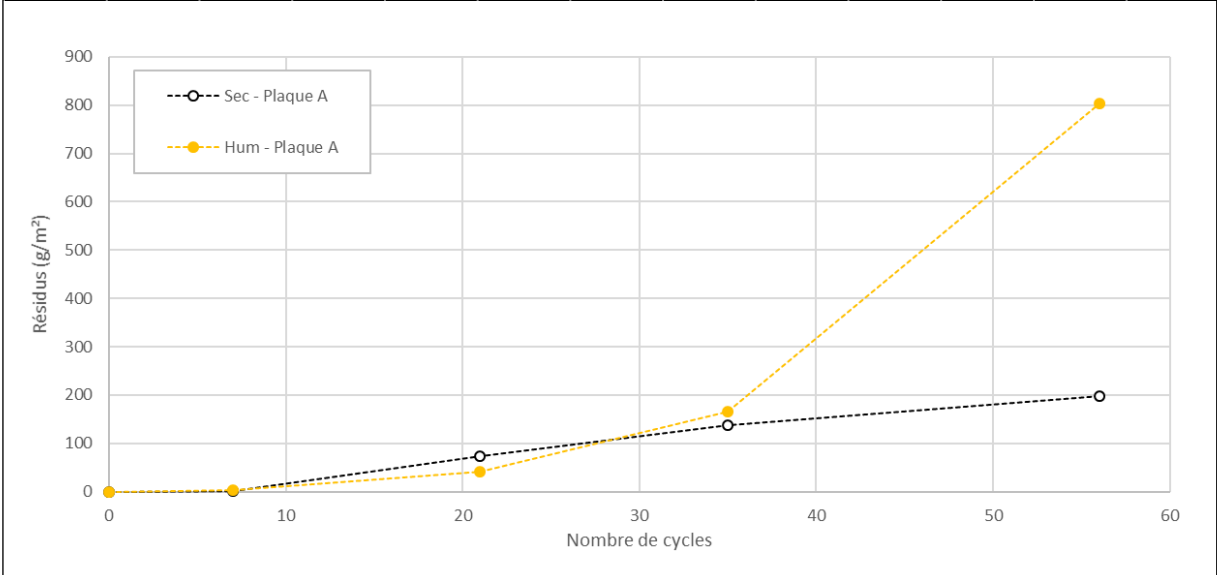
Sec

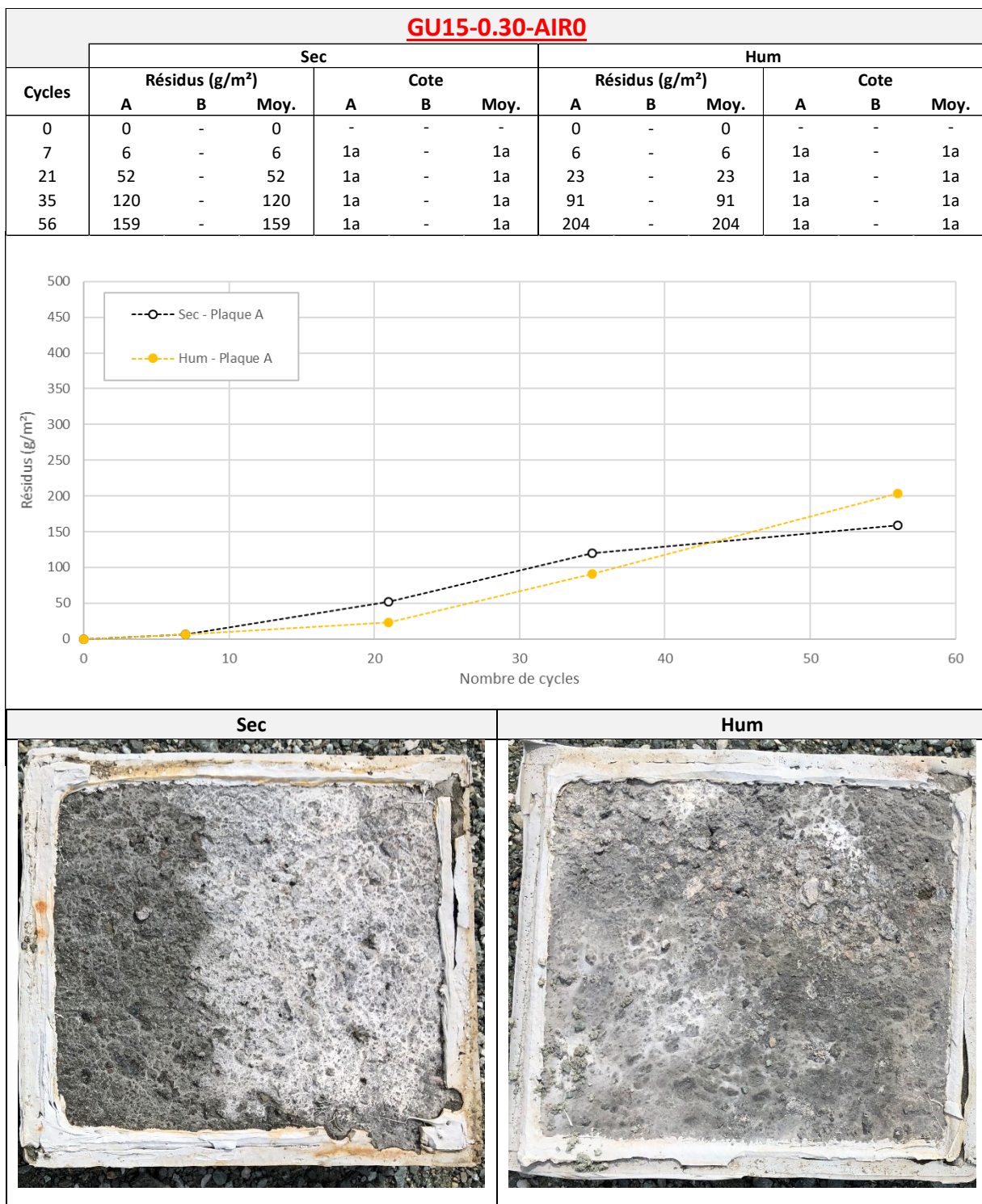


Hum

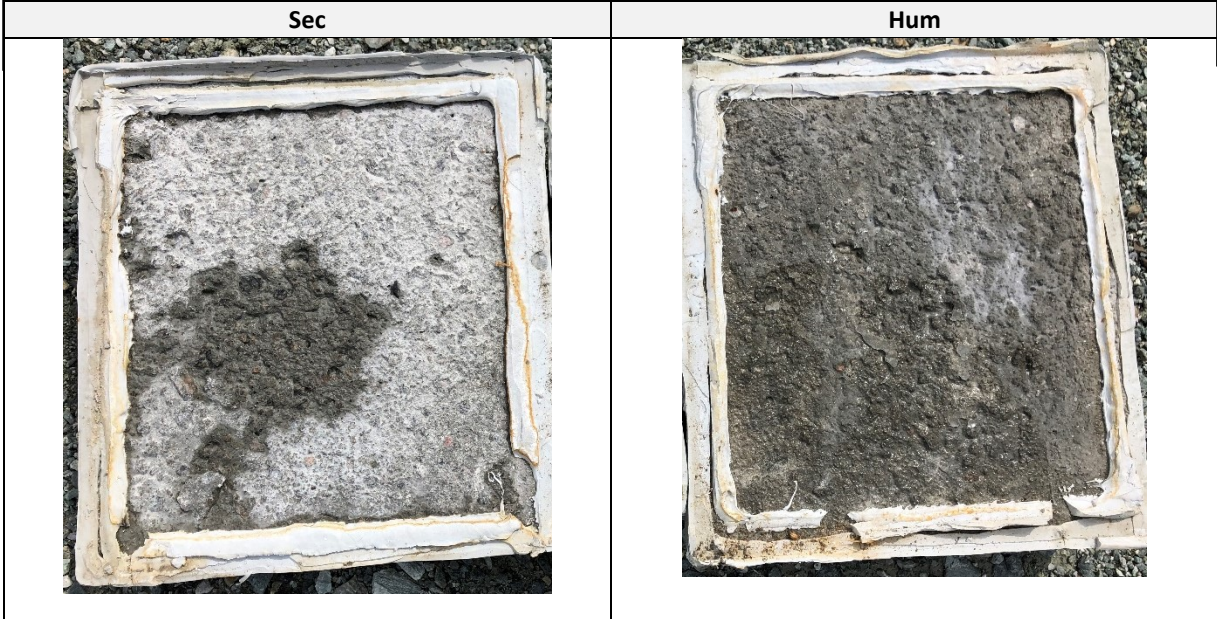
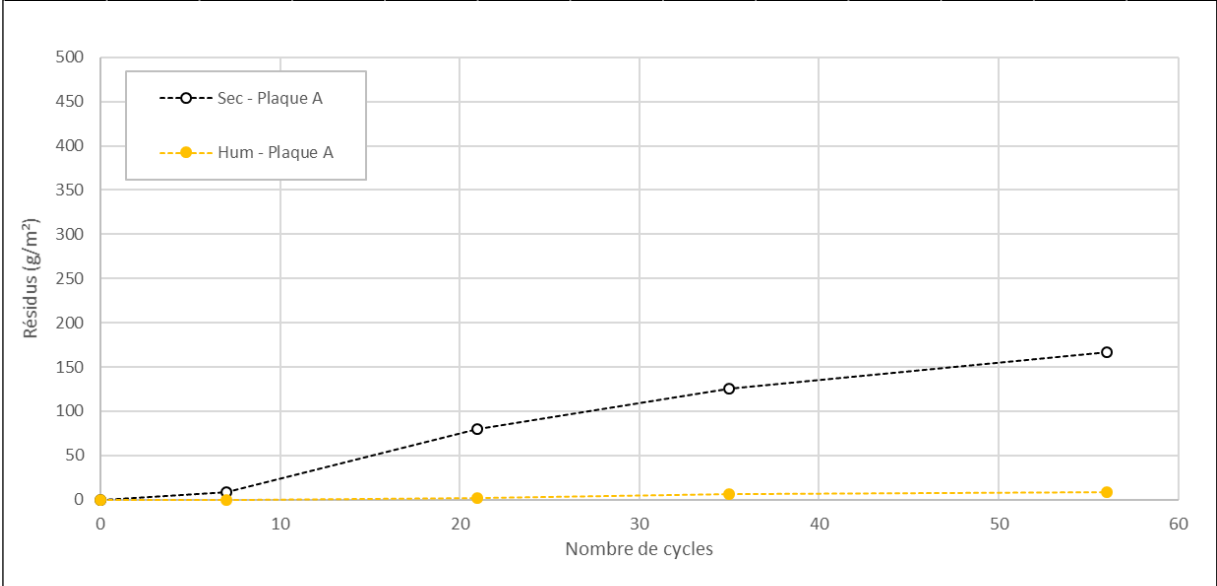


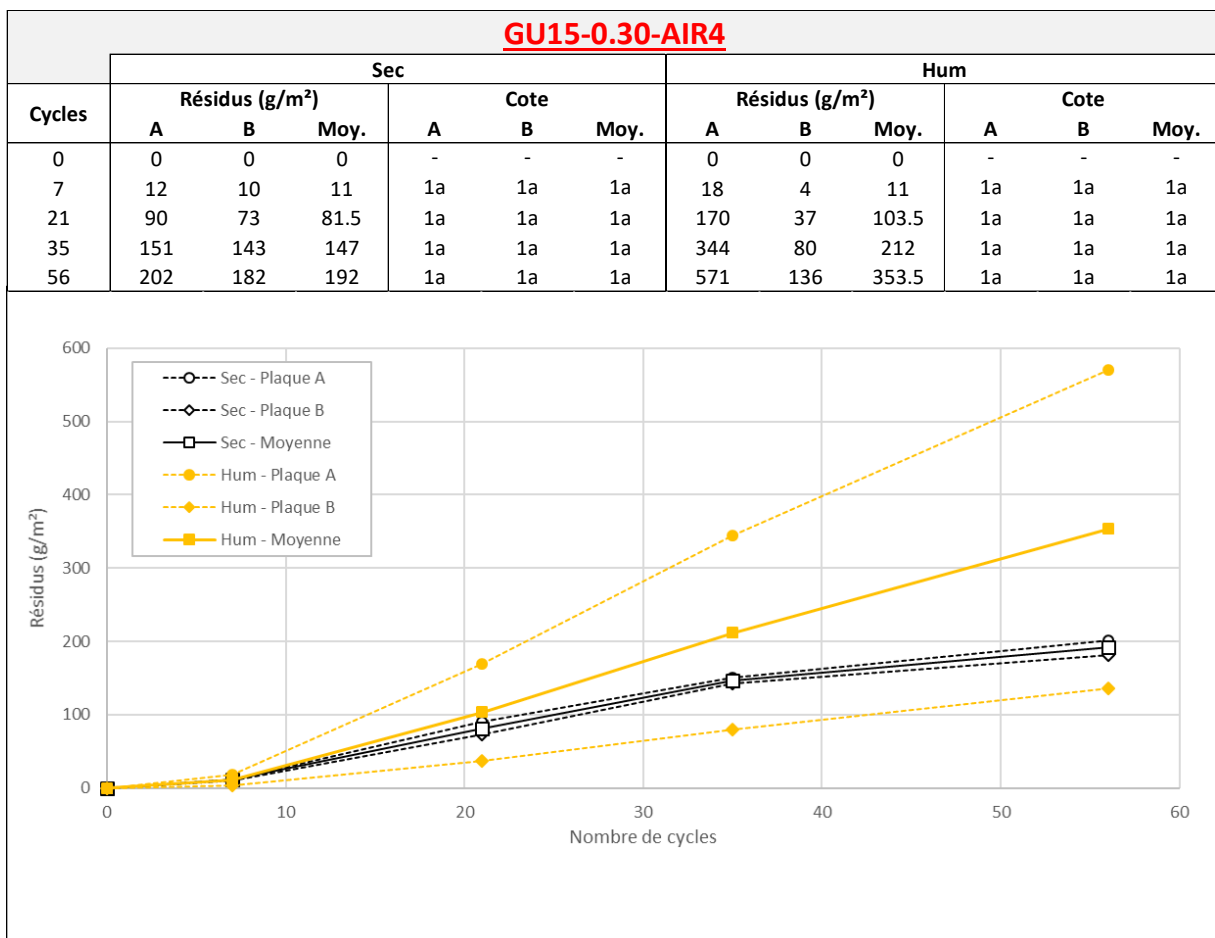
GU15-0.30-DEF												
Cycles	Sec						Hum					
	Résidus (g/m ²)			Cote			Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	-	0	-	-	-	0	-	0	-	-	-
7	2	-	2	1a	-	1a	4	-	4	1a	-	1a
21	74	-	74	1a	-	1a	41	-	41	1a	-	1a
35	137	-	137	1a	-	1a	165	-	165	1a	-	1a
56	197	-	197	1a	-	1a	803	-	803	1a	-	1a





GU15-0.30-AIR1												
Cycles	Sec						Hum					
	Résidus (g/m ²)			Cote			Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	-	0	-	-	-	0	-	0	-	-	-
7	8	-	8	1a	-	1a	0	-	0	1a	-	1a
21	80	-	80	1a	-	1a	2	-	2	1a	-	1a
35	123	-	123	1a	-	1a	6	-	6	1a	-	1a
56	167	-	167	1a	-	1a	8	-	8	1a	-	1a





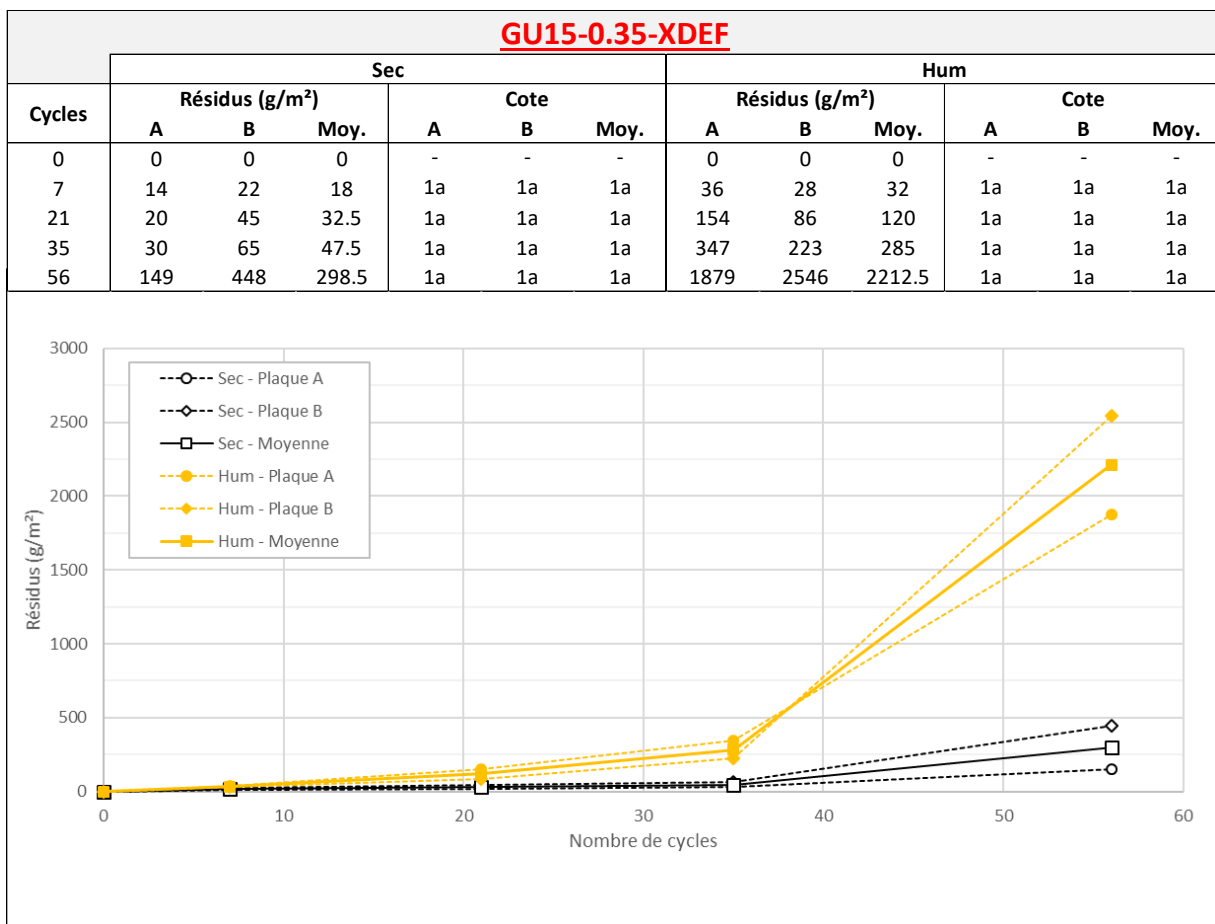
GU15-0.30-AIR4

Sec



Hum





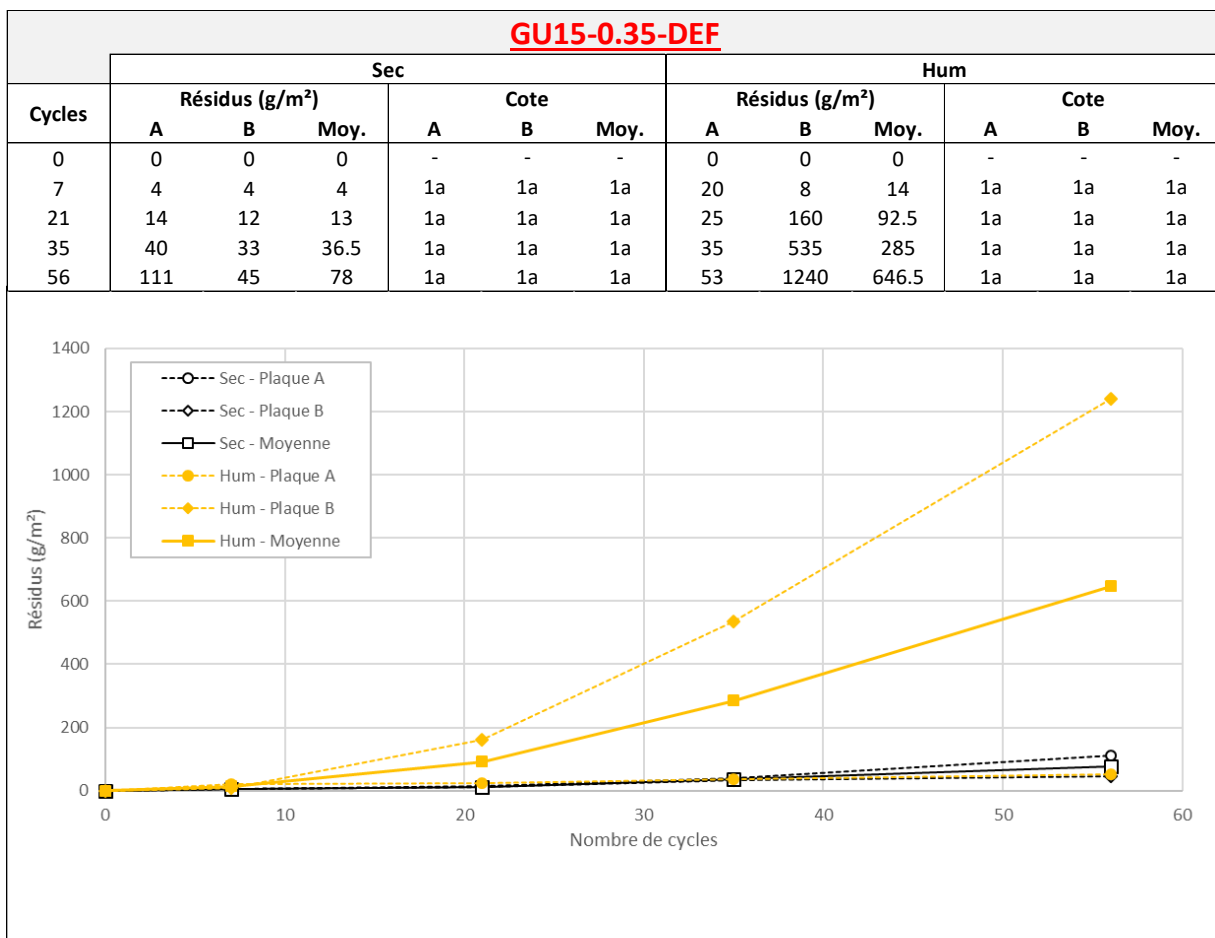
GU15-0.35-XDEF

Sec



Hum





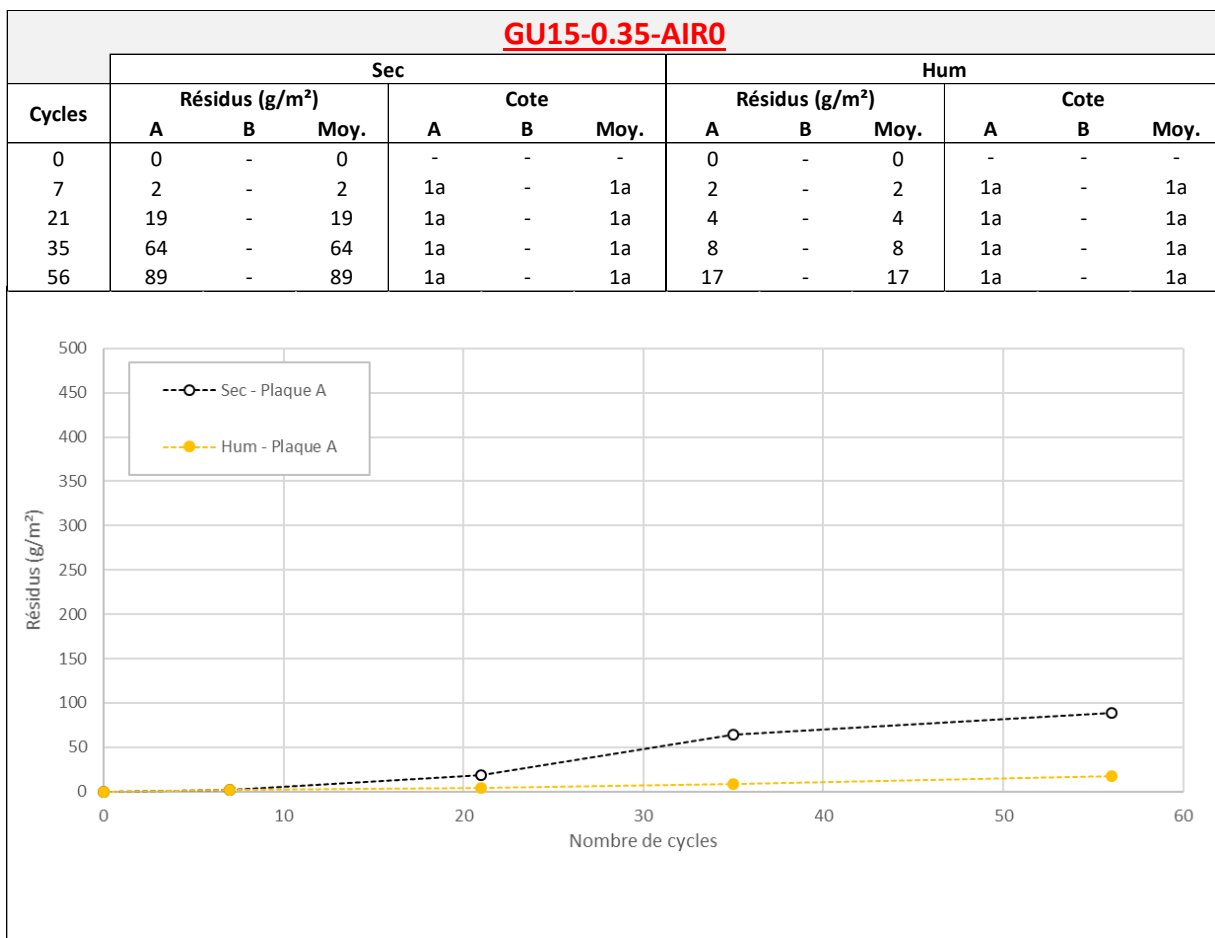
GU15-0.35-DEF

Sec



Hum





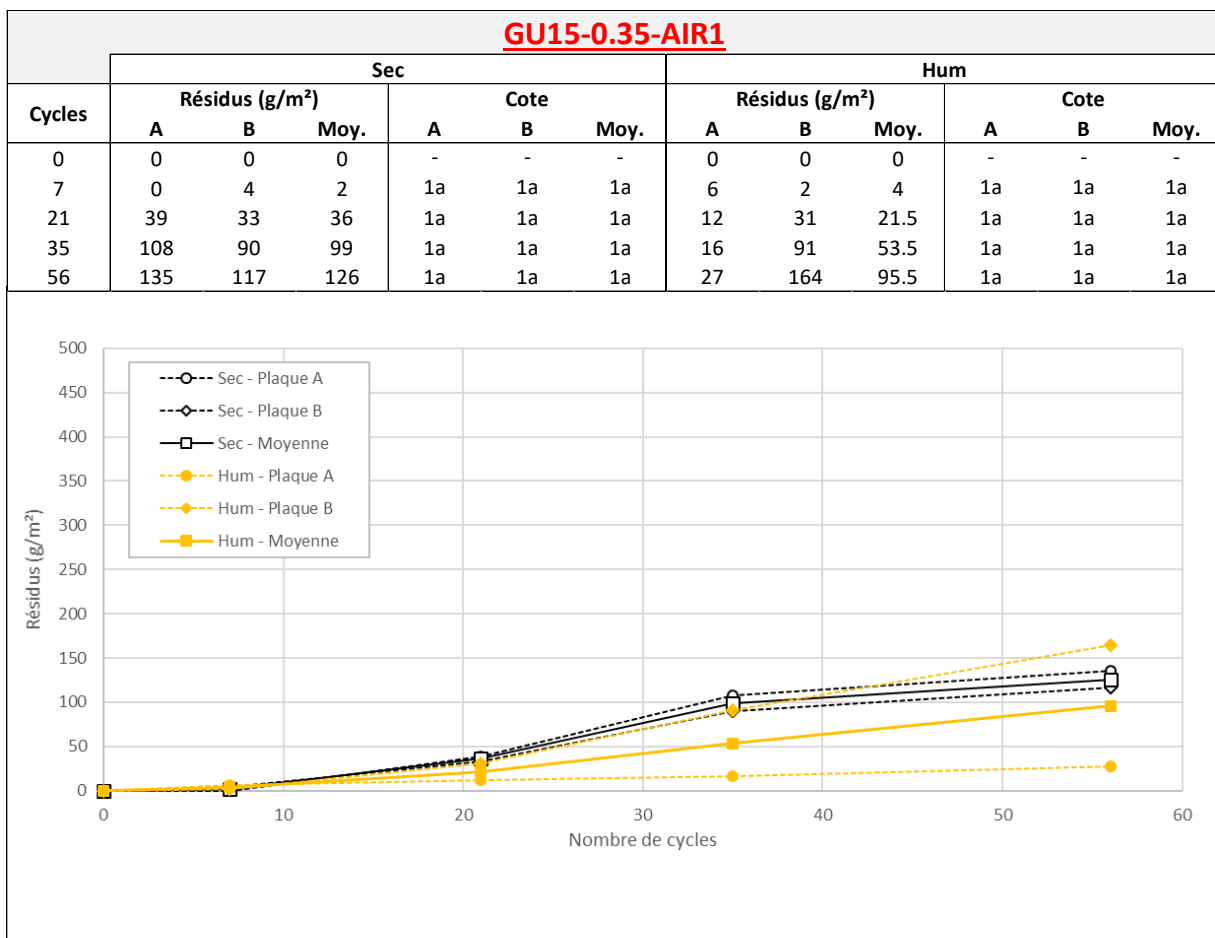
GU15-0.35-AIR0

Sec



Hum





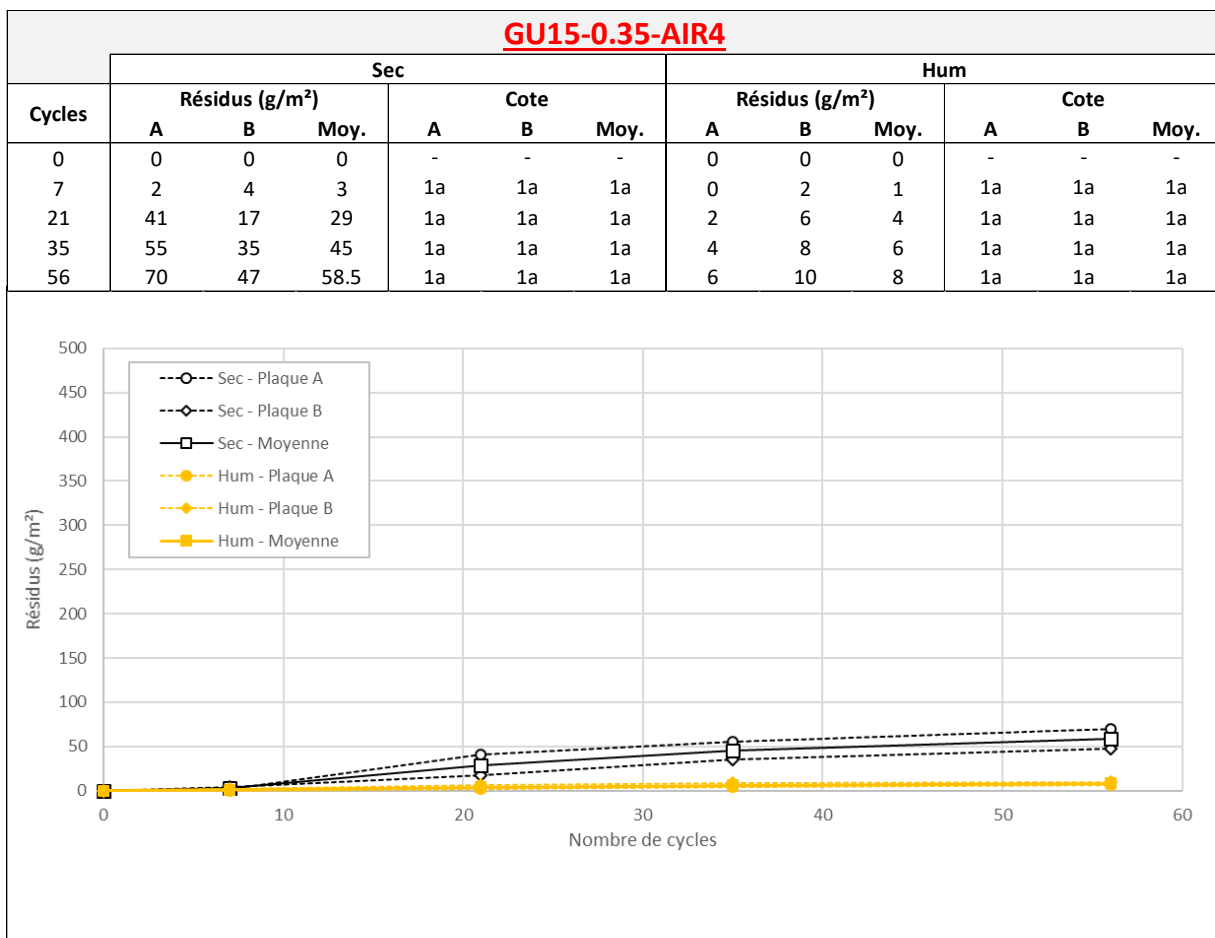
GU15-0.35-AIR1

Sec



Hum





GU15-0.35-AIR4

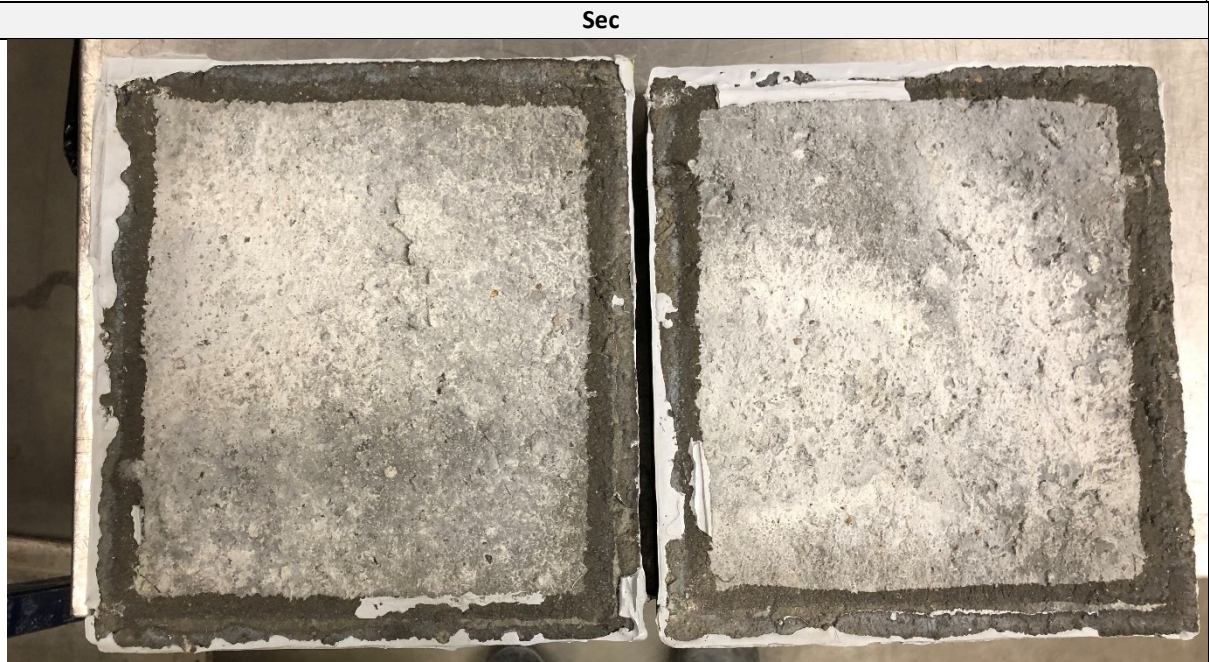
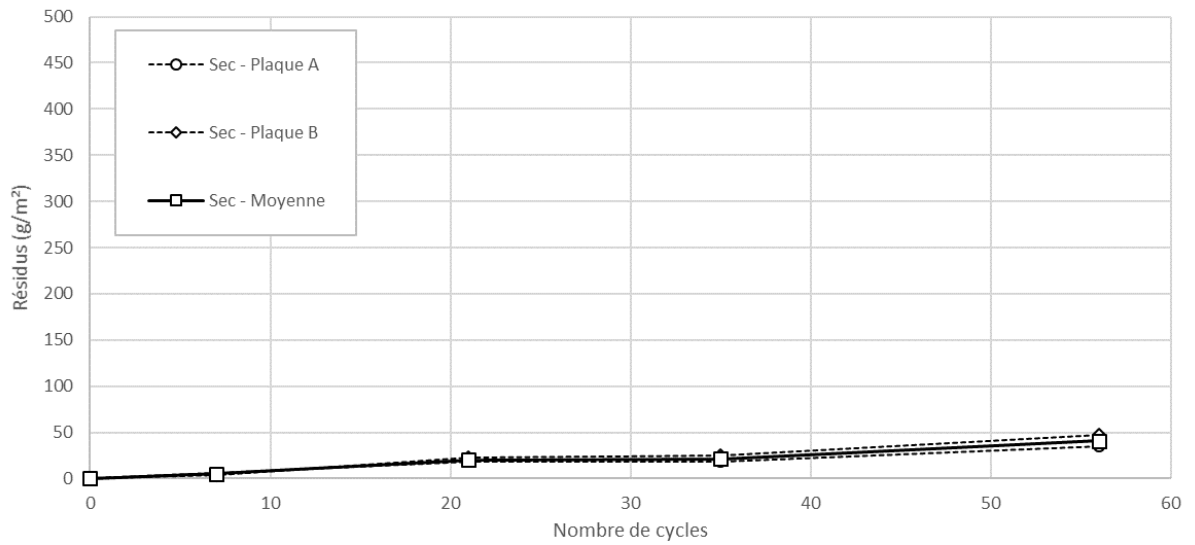
Sec



Hum

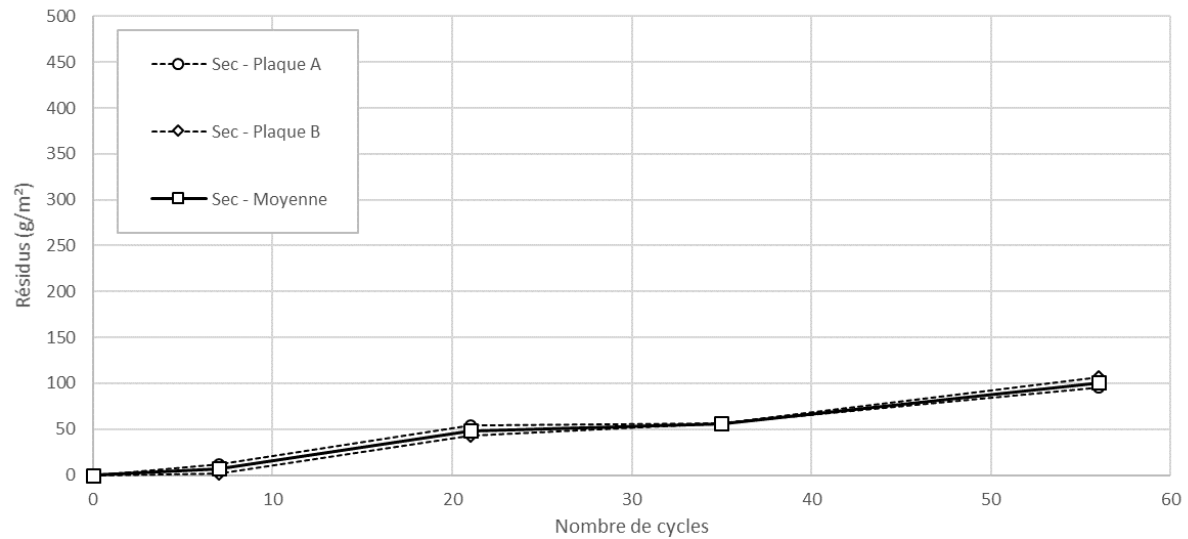


GUCH15-DEF						
Cycles	Sec					
	Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	0	0	-	-	-
7	6	4	5	1a	1a	1a
21	18	23	20.5	1a	1a	1a
35	18	25	21.5	1a	1a	1a
56	35	47	41	1a	1a	1a



GUCH15-AIRO

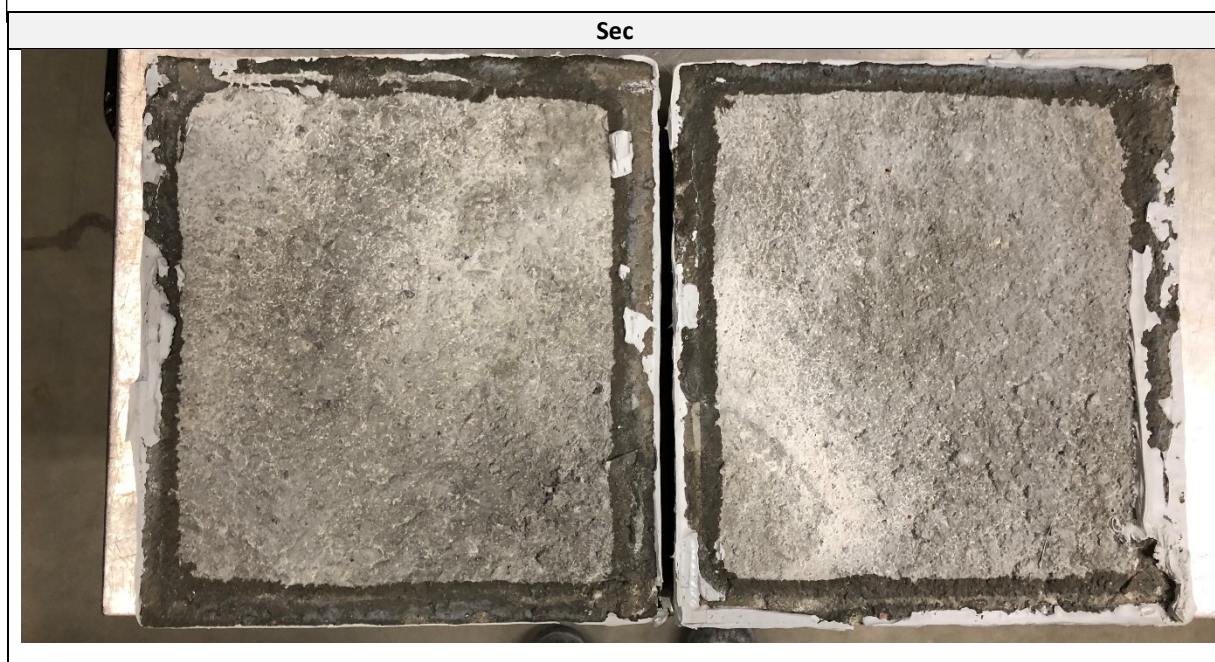
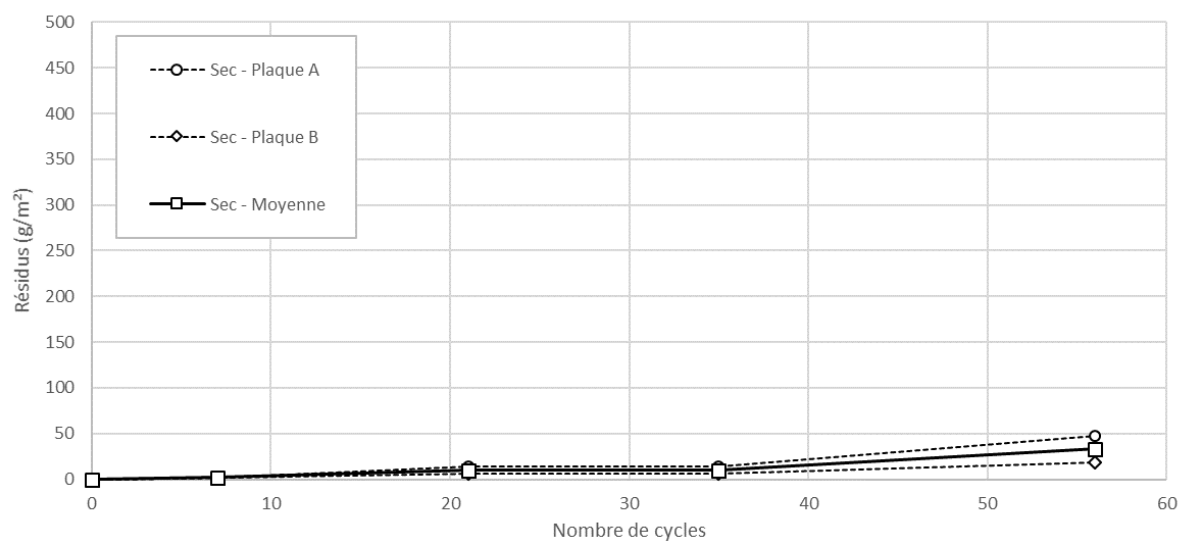
Cycles	Sec					
	Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	0	0	-	-	-
7	12	2	7	1a	1a	1a
21	54	43	48.5	1a	1a	1a
35	56	56	56	1a	1a	1a
56	95	107	101	1a	1a	1a



Sec

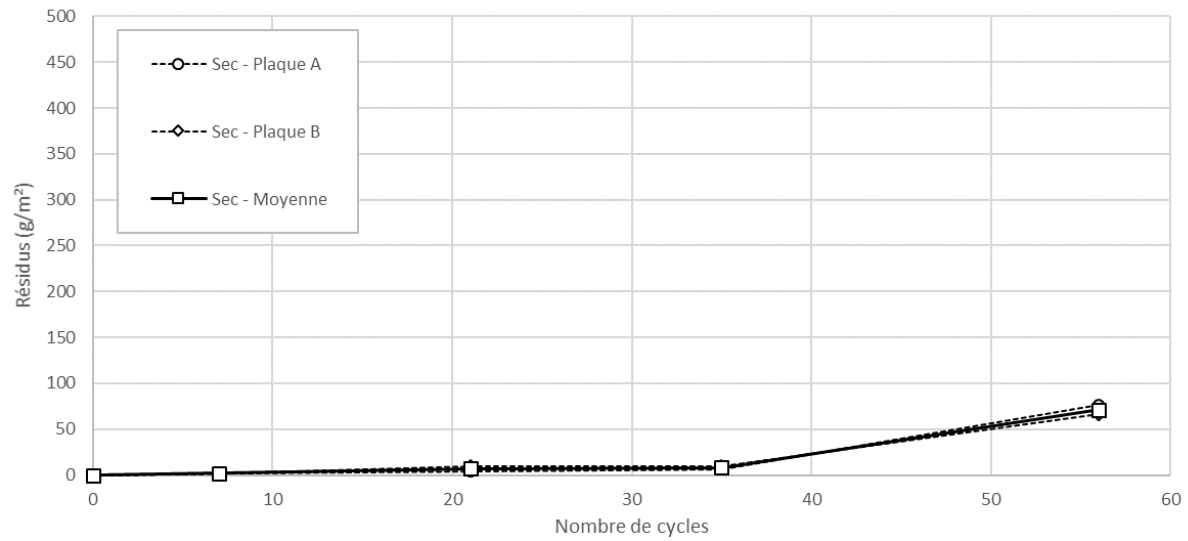


GUCH15-AIR1						
Cycles	Sec					
	Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	0	0	-	-	-
7	2	2	2	1a	1a	1a
21	14	6	10	1a	1a	1a
35	14	6	10	1a	1a	1a
56	47	19	33	1a	1a	1a



GUCH15-AIR4

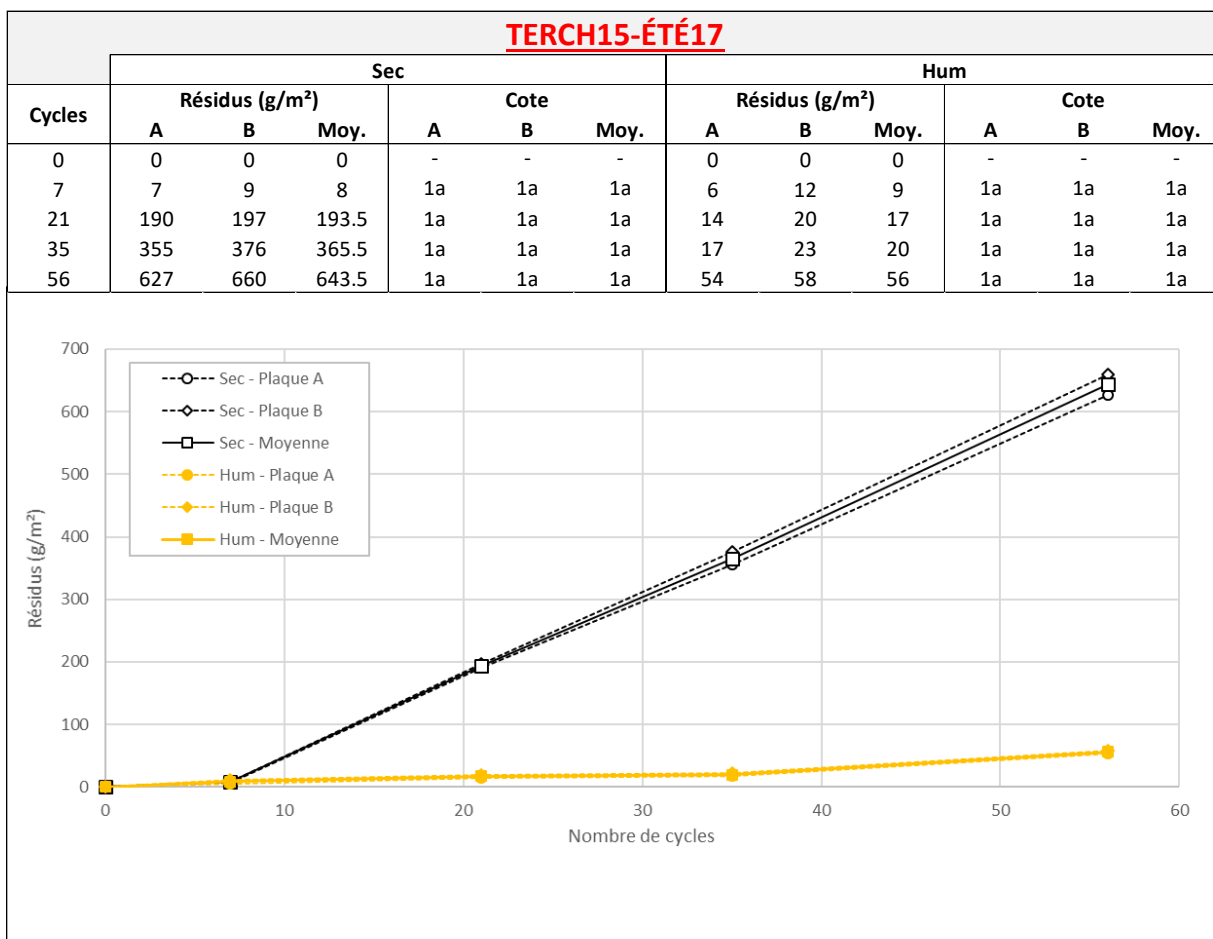
Cycles	Sec					
	Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	0	0	-	-	-
7	2	2	2	1a	1a	1a
21	4	10	7	1a	1a	1a
35	6	10	8	1a	1a	1a
56	76	66	71	1a	1a	1a



Sec



Liant ternaire

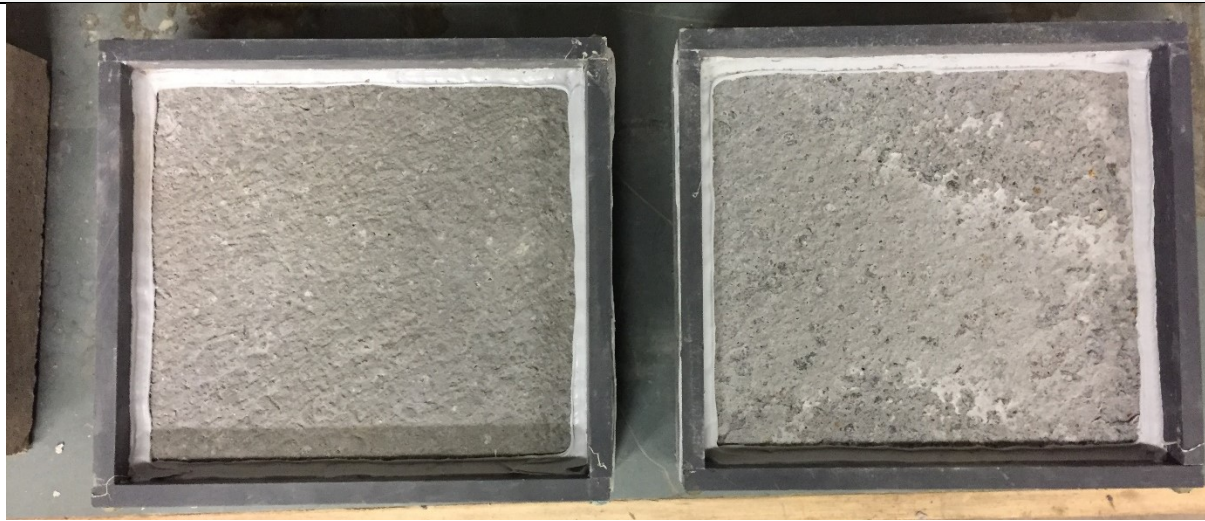


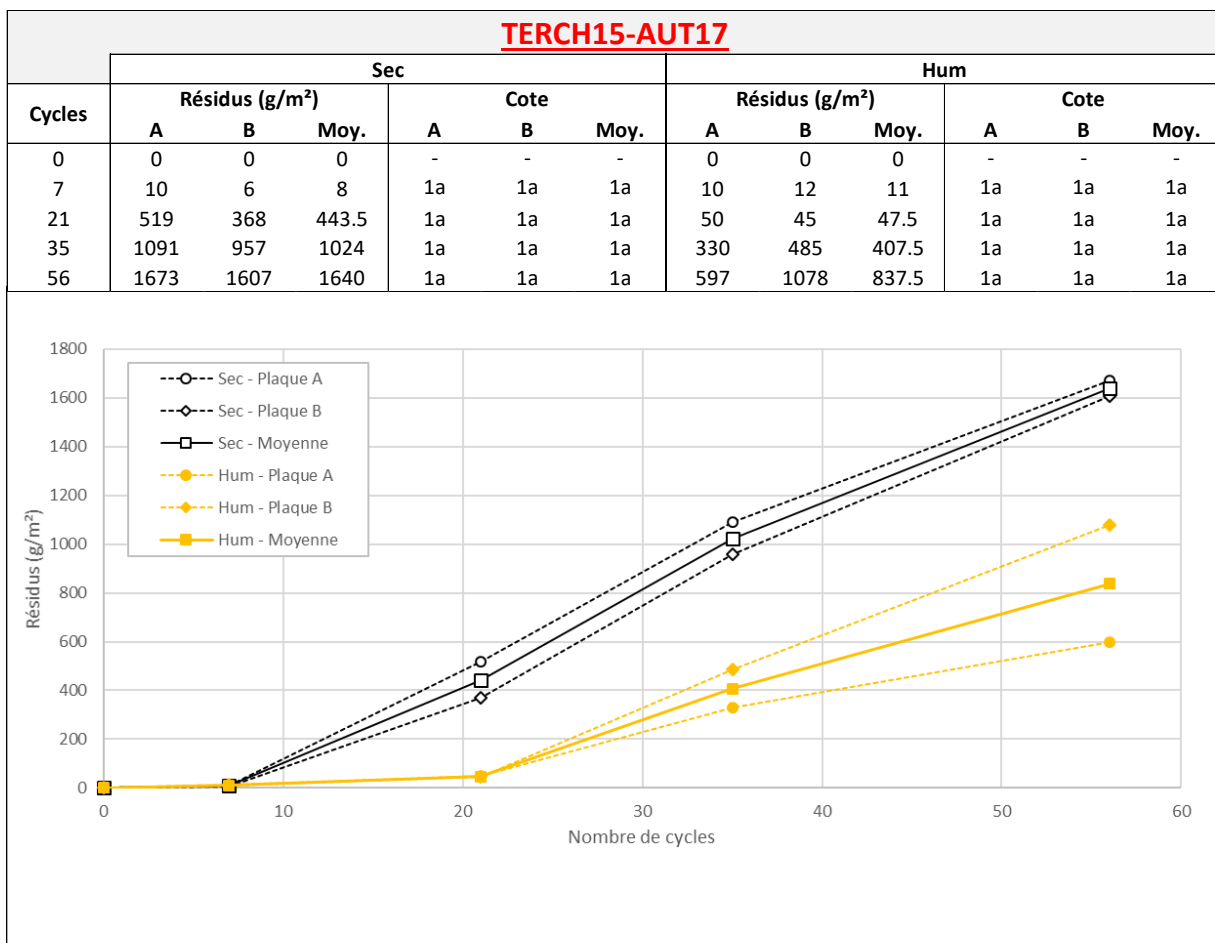
TERCH15-ÉTÉ17

Sec



Hum



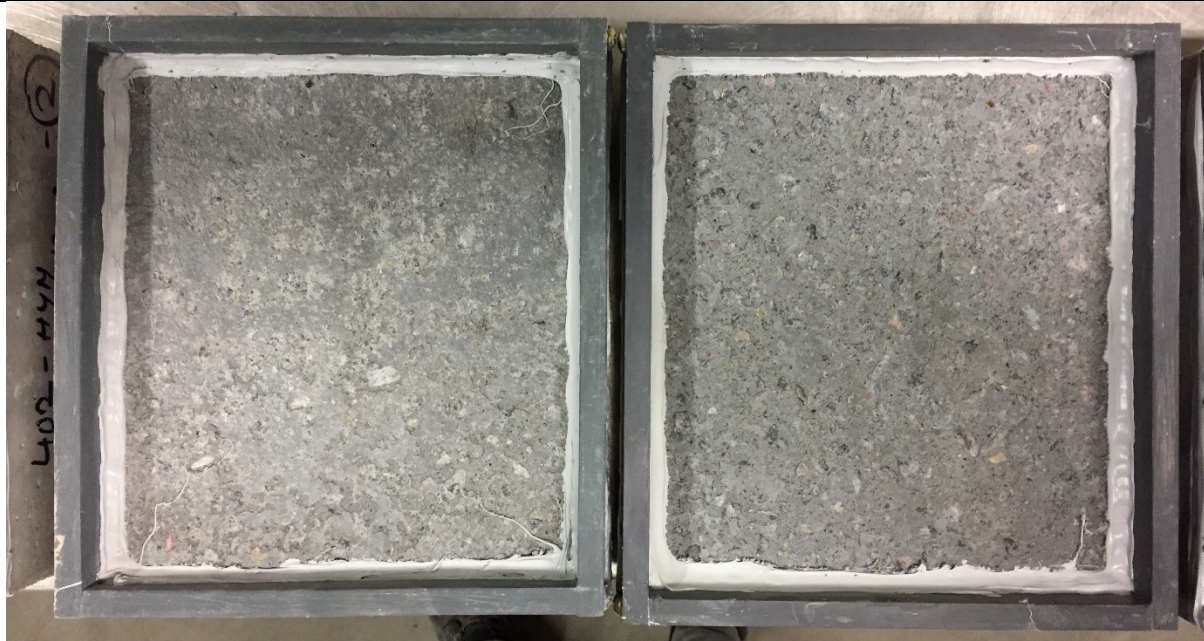


TERCH15-AUT17

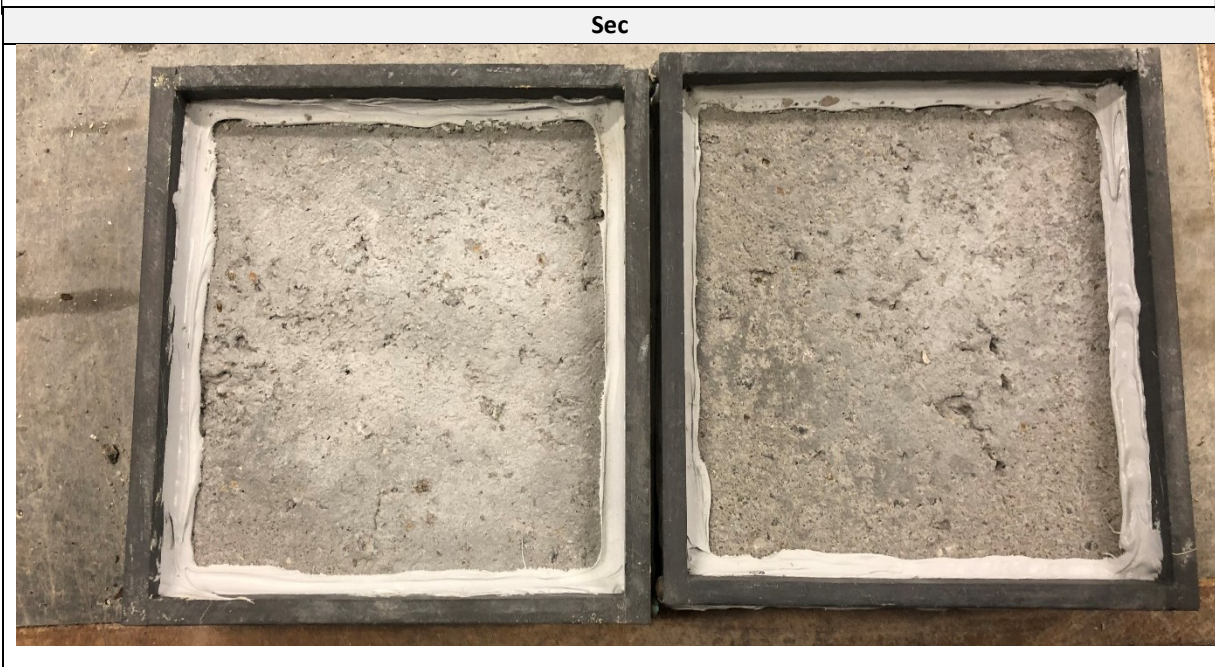
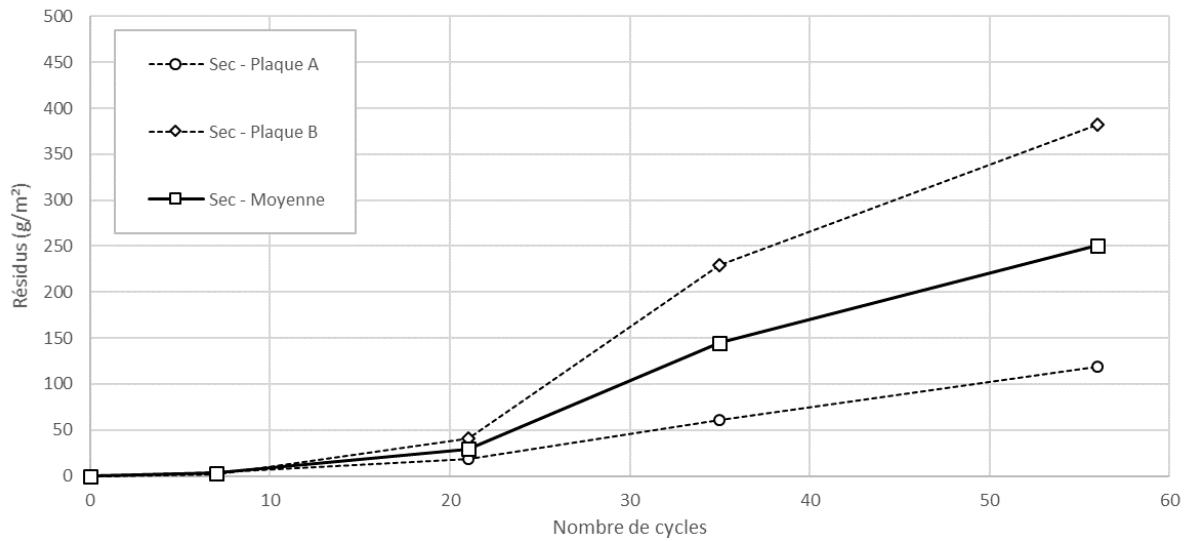
Sec

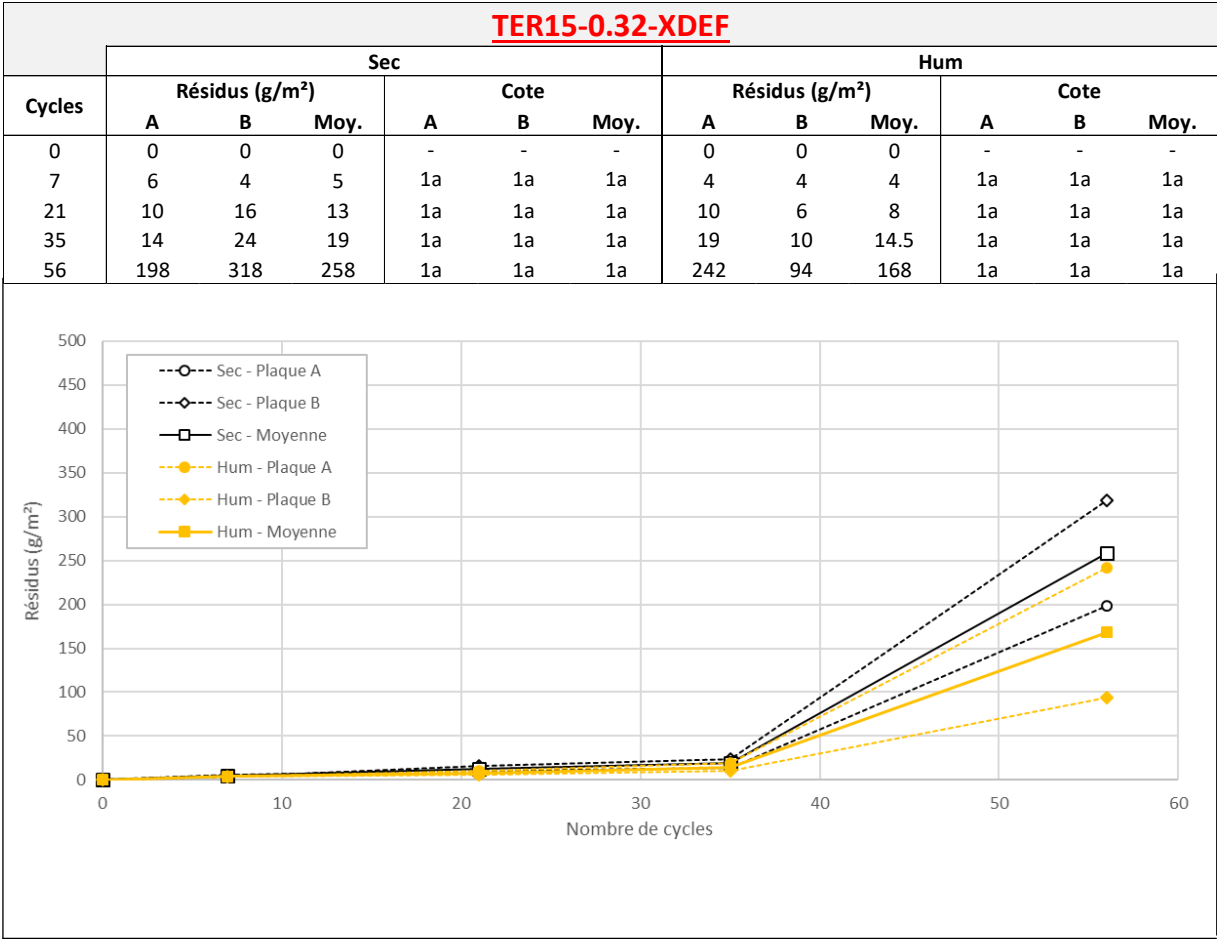


Hum



TERCH15-VAL						
Cycles	Sec					
	Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	0	0	-	-	-
7	4	2	3	1a	1a	1a
21	18	41	29.5	1a	1a	1a
35	61	229	145	1a	1a	1a
56	119	382	250.5	1a	1a	1a





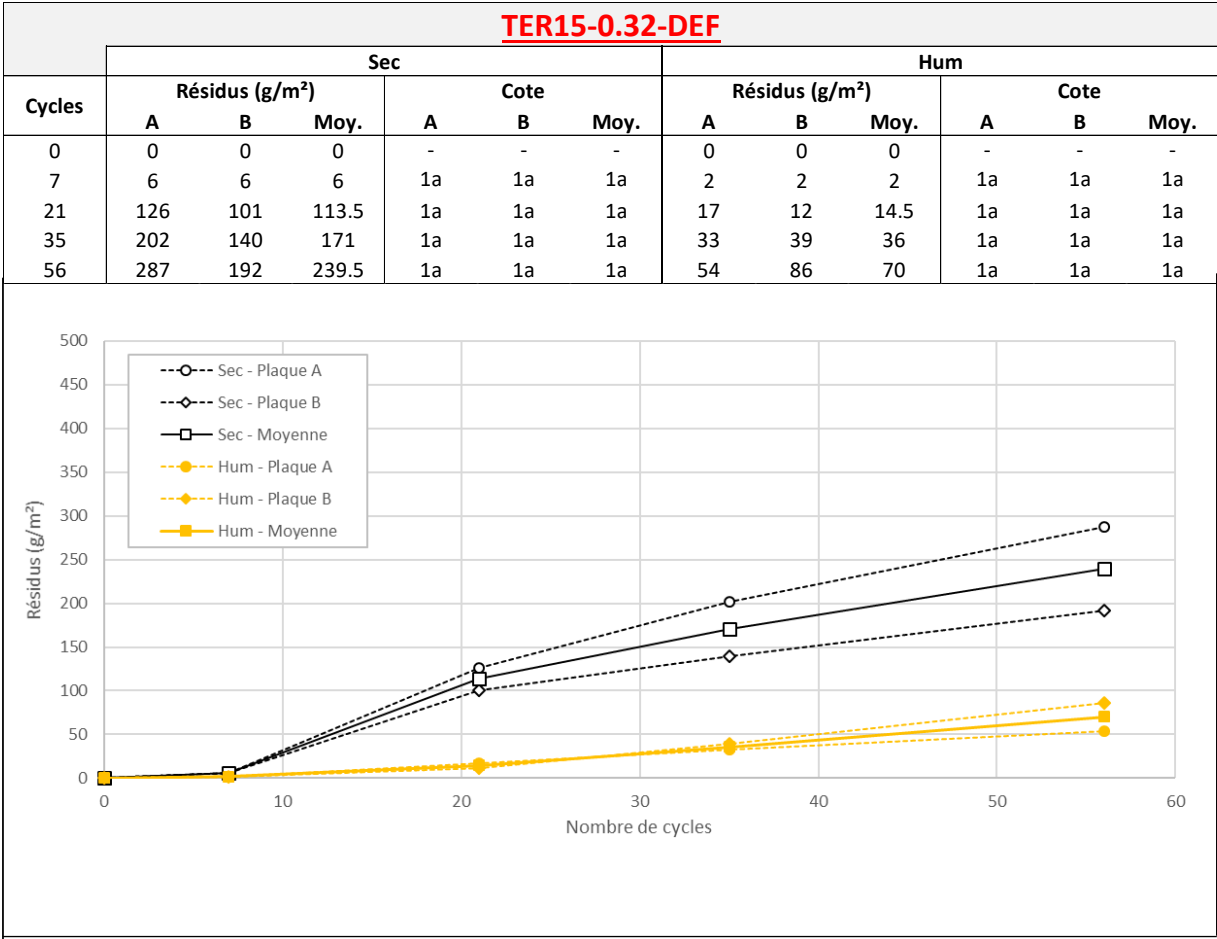
TER15-0.32-XDEF

Sec



Hum





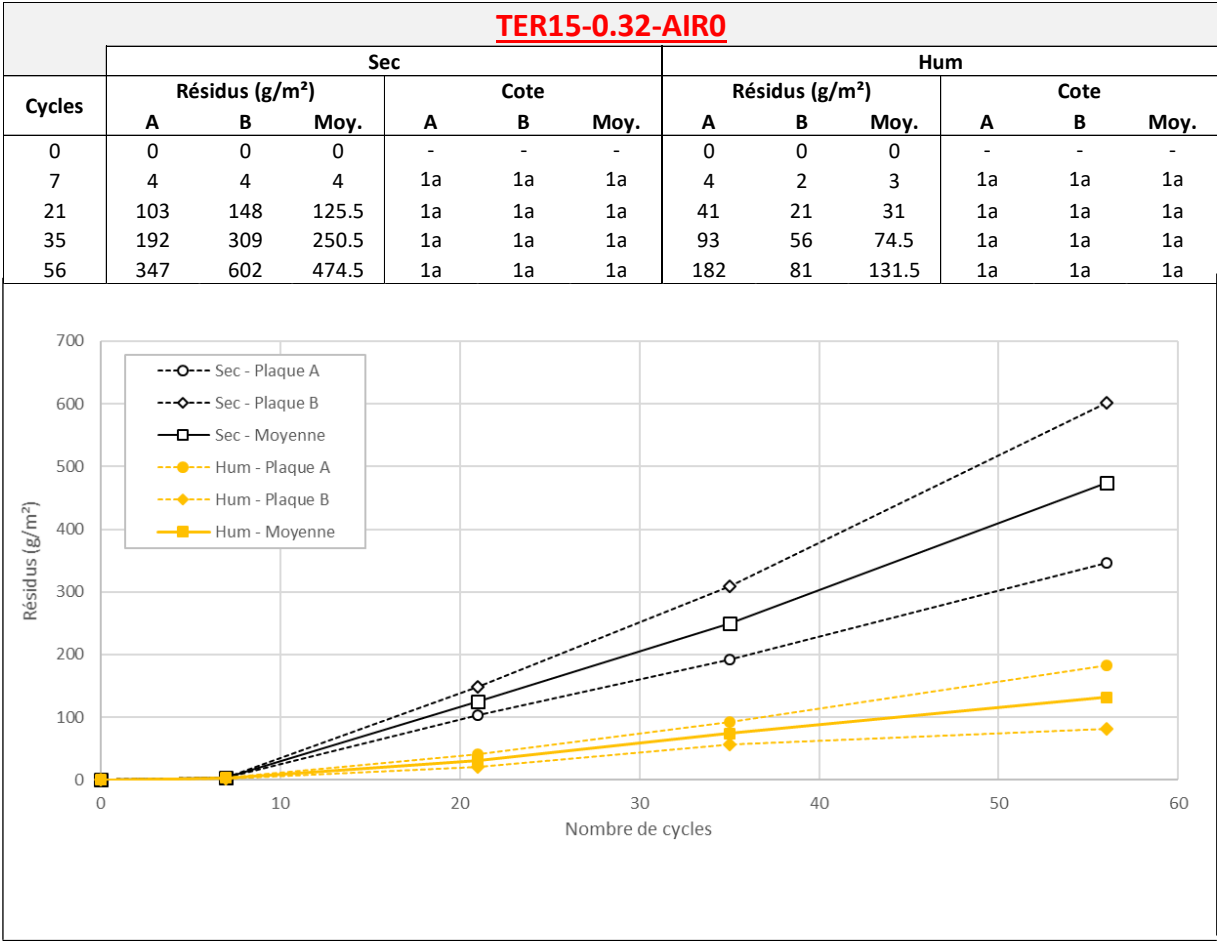
TER15-0.32-DEF

Sec



Hum





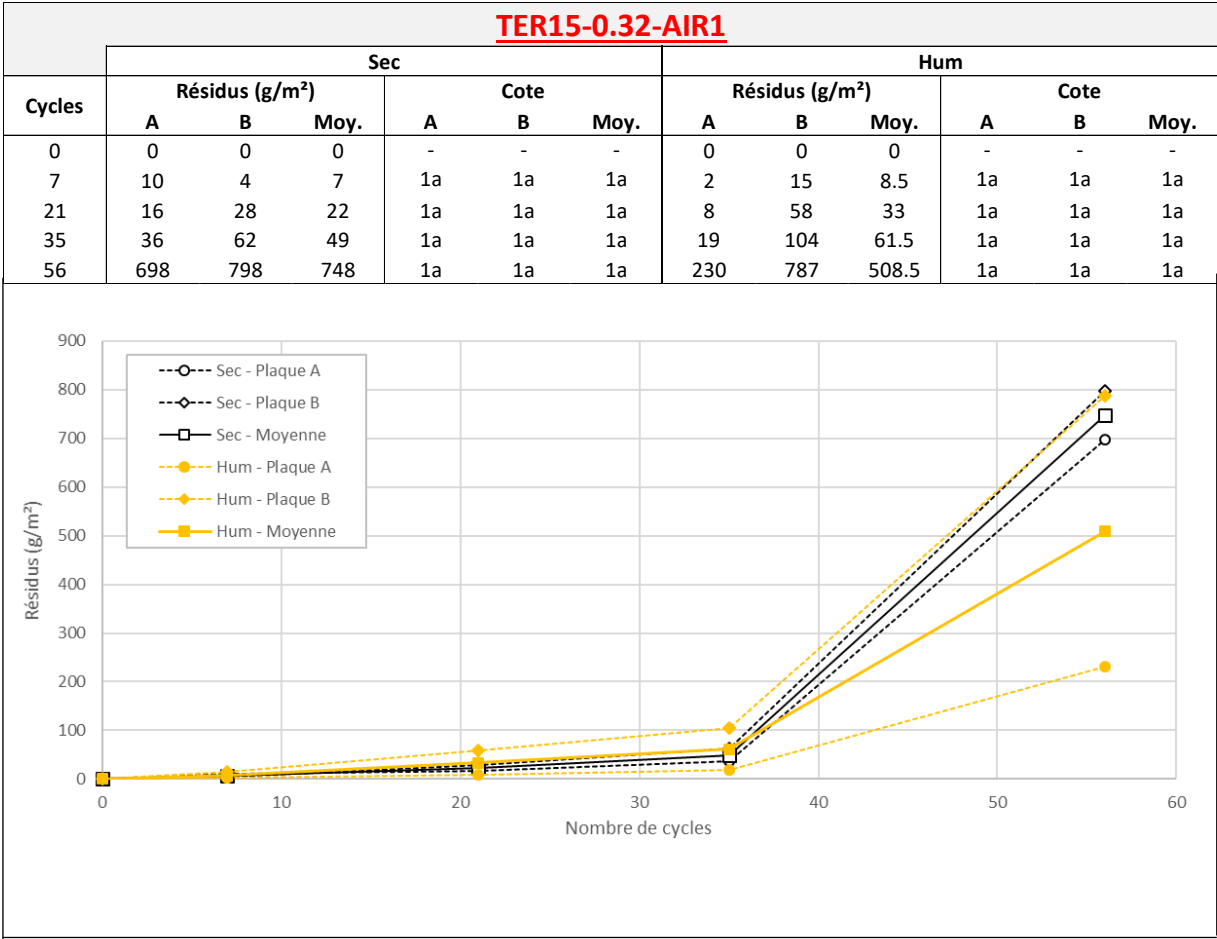
TER15-0.32-AIR0

Sec



Hum





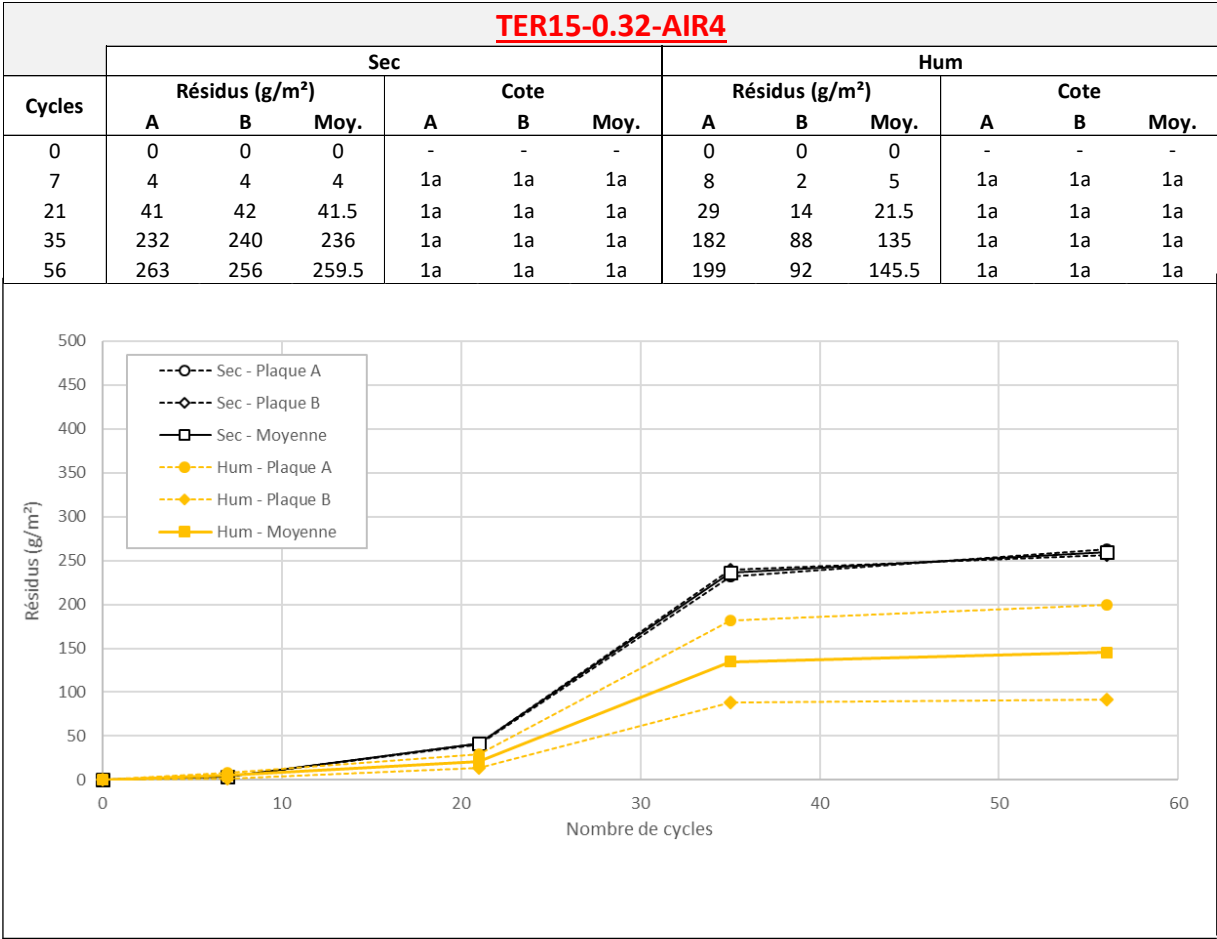
TER15-0.32-AIR1

Sec



Hum





TER15-0.32-AIR4

Sec

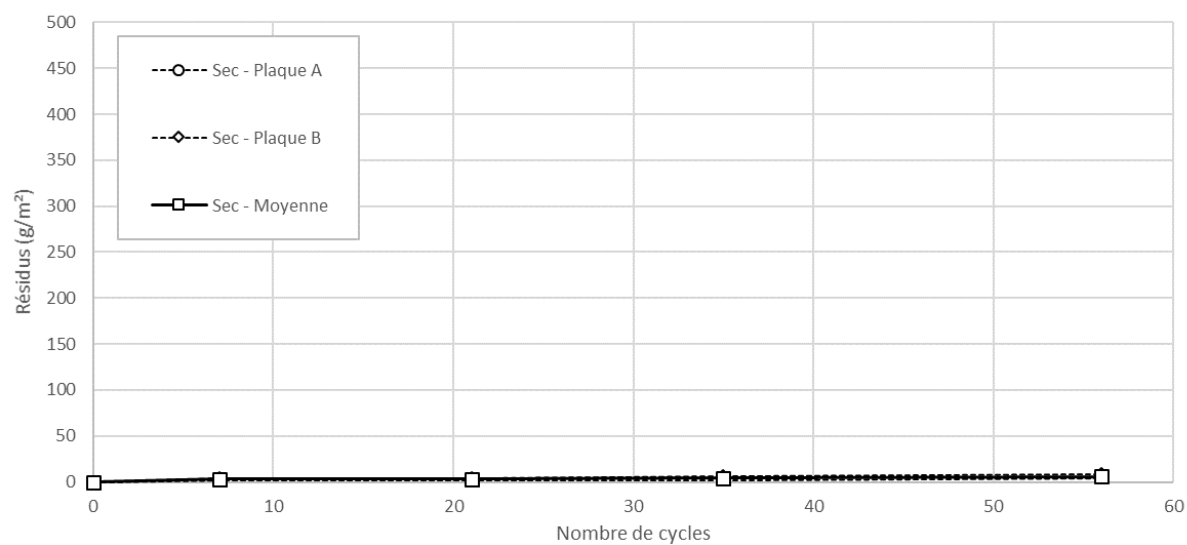


Hum

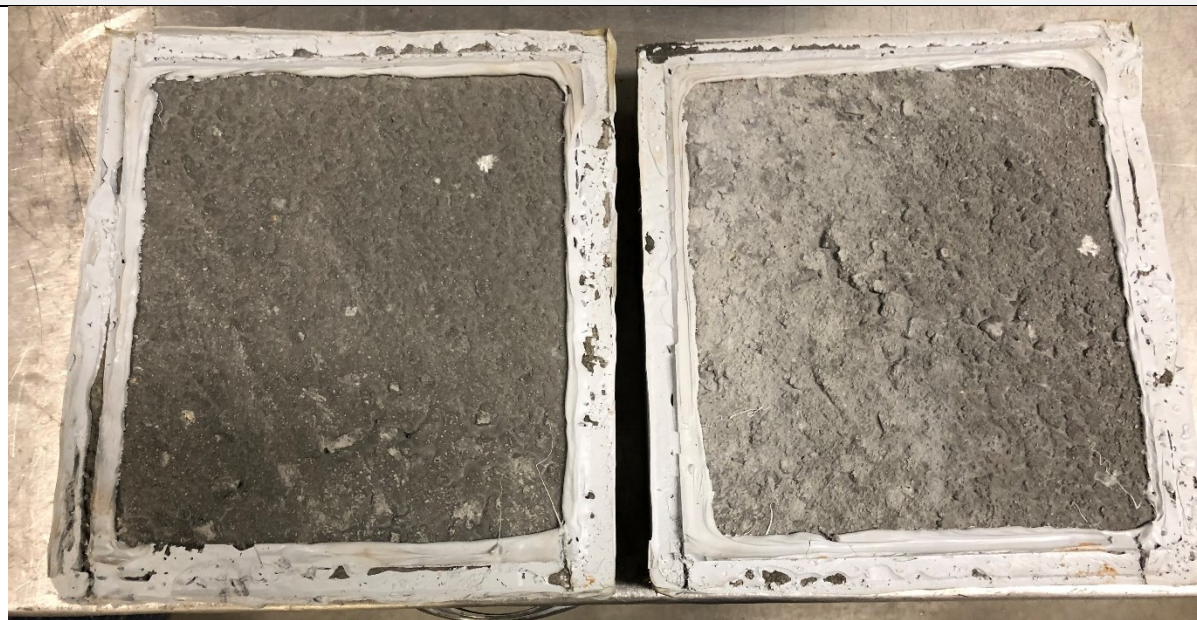


TERCH15-DEF

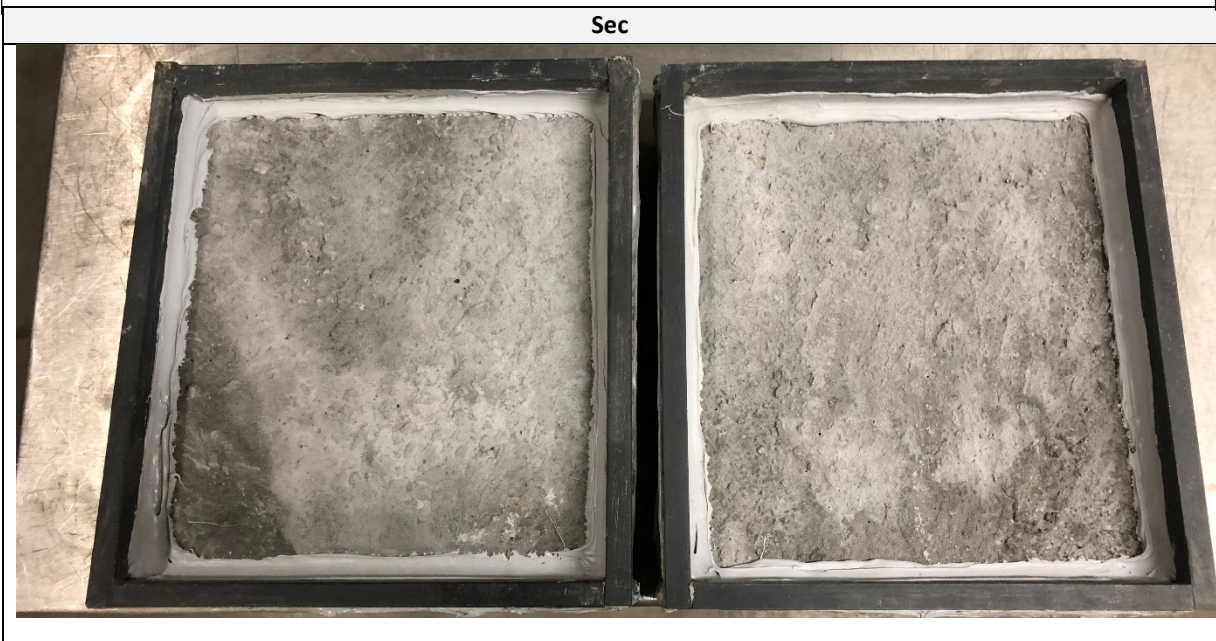
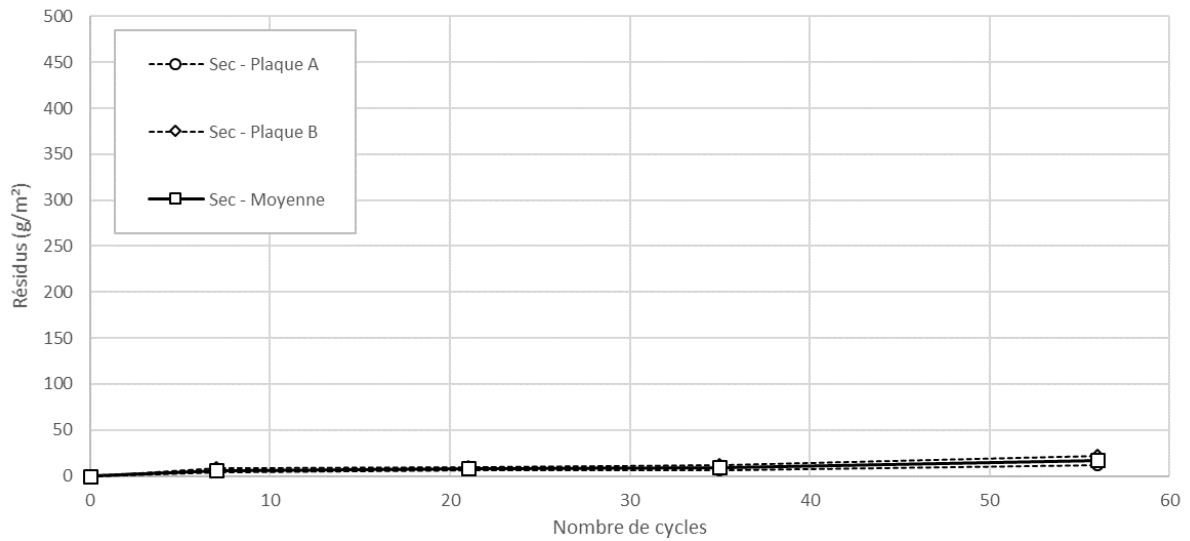
Cycles	Sec					
	Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	0	0	-	-	-
7	2	4	3	1a	1a	1a
21	2	4	3	1a	1a	1a
35	2	6	4	1a	1a	1a
56	4	8	6	1a	1a	1a



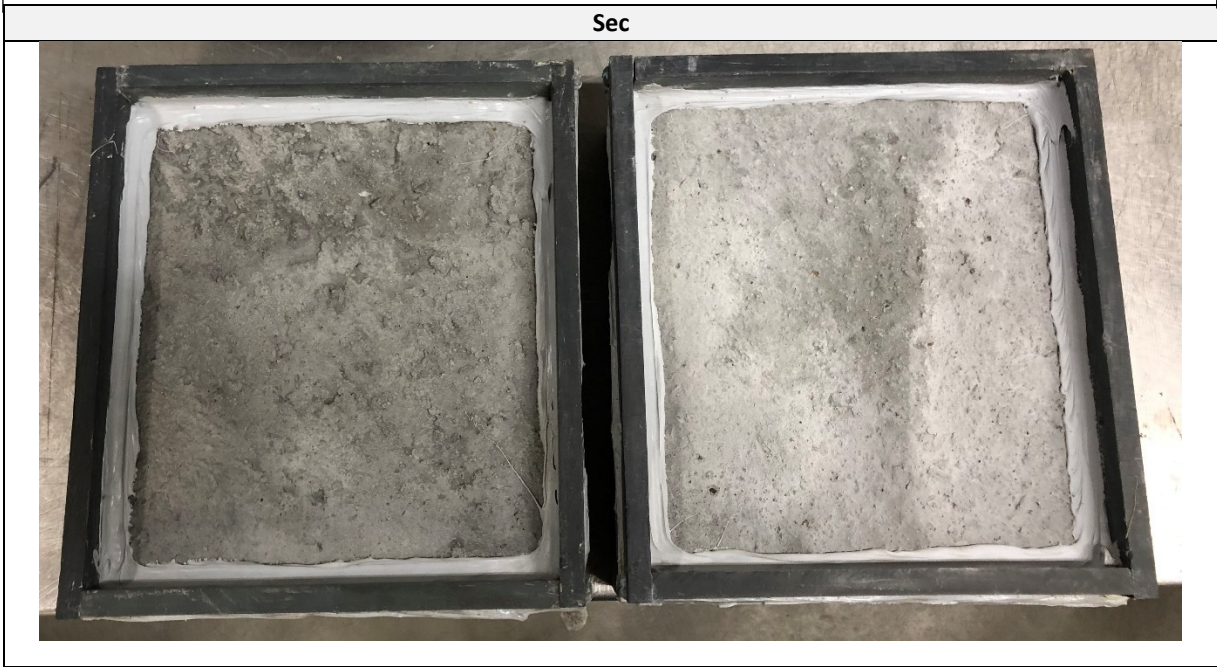
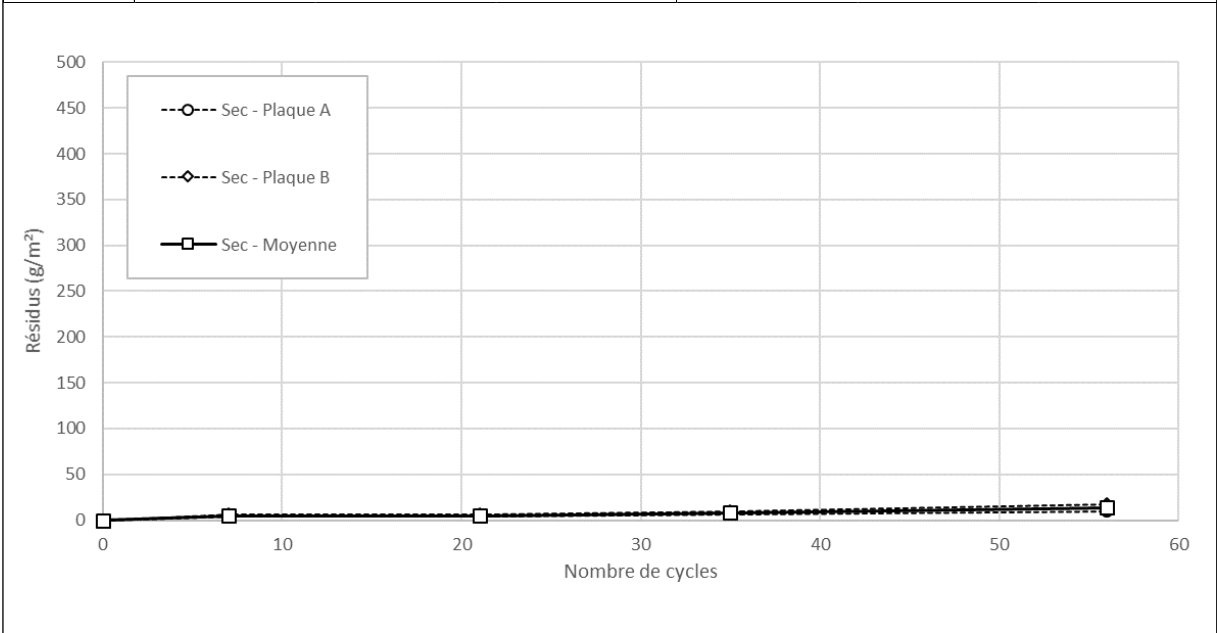
Sec



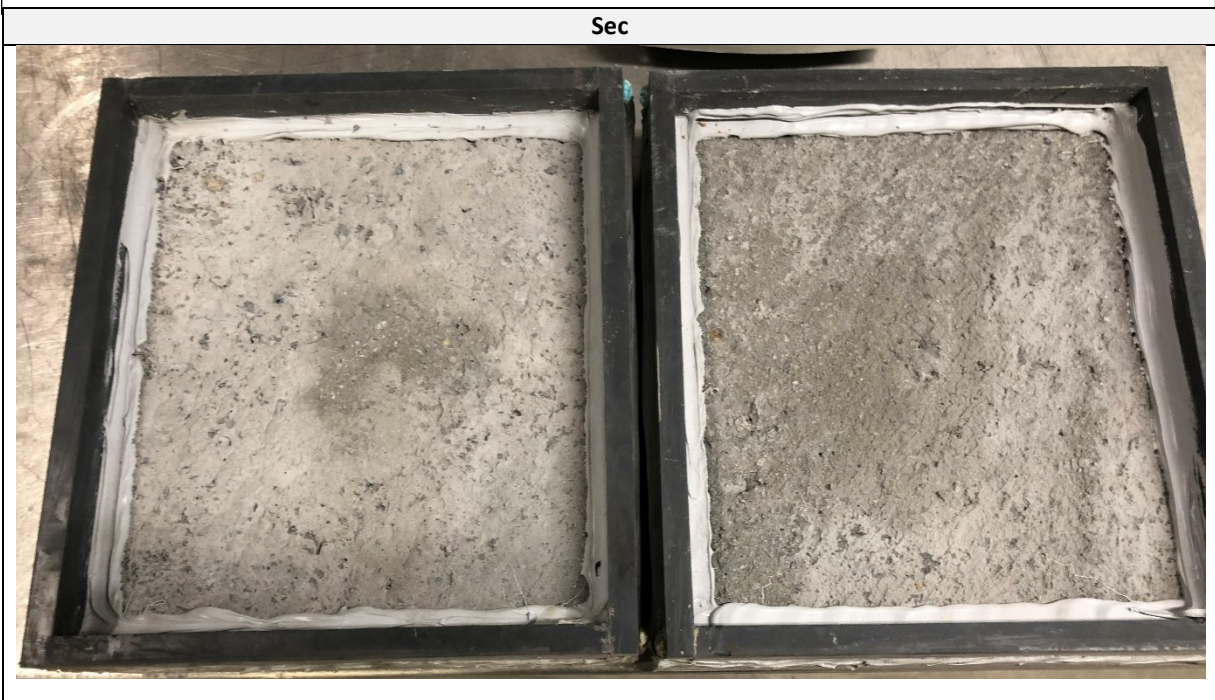
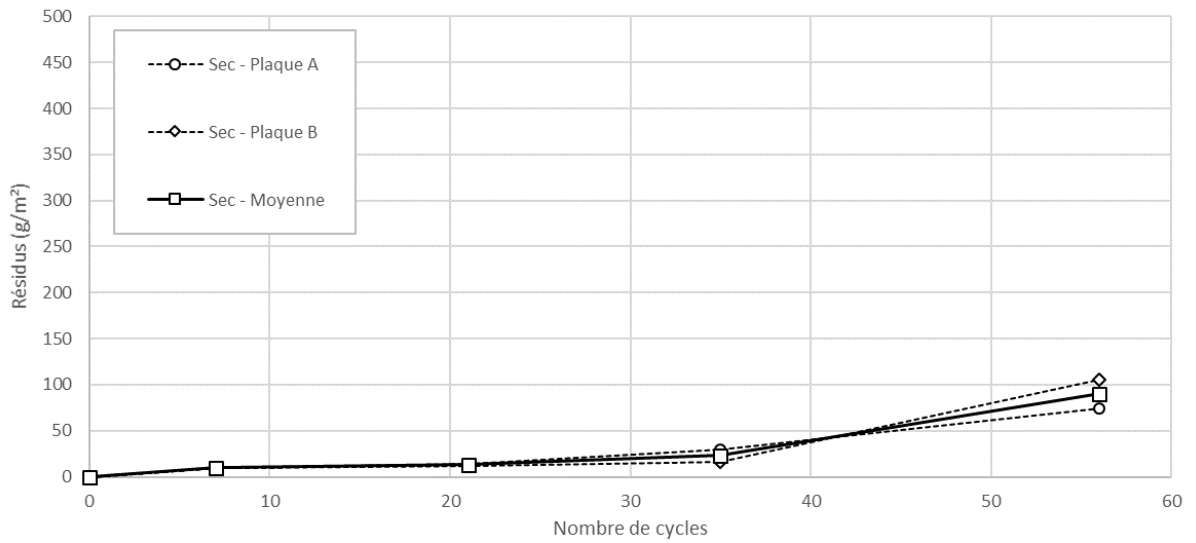
TERCH15-AIRO						
Cycles	Sec					
	Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	0	0	-	-	-
7	4	8	6	1a	1a	1a
21	6	10	8	1a	1a	1a
35	6	12	9	1a	1a	1a
56	12	22	17	1a	1a	1a



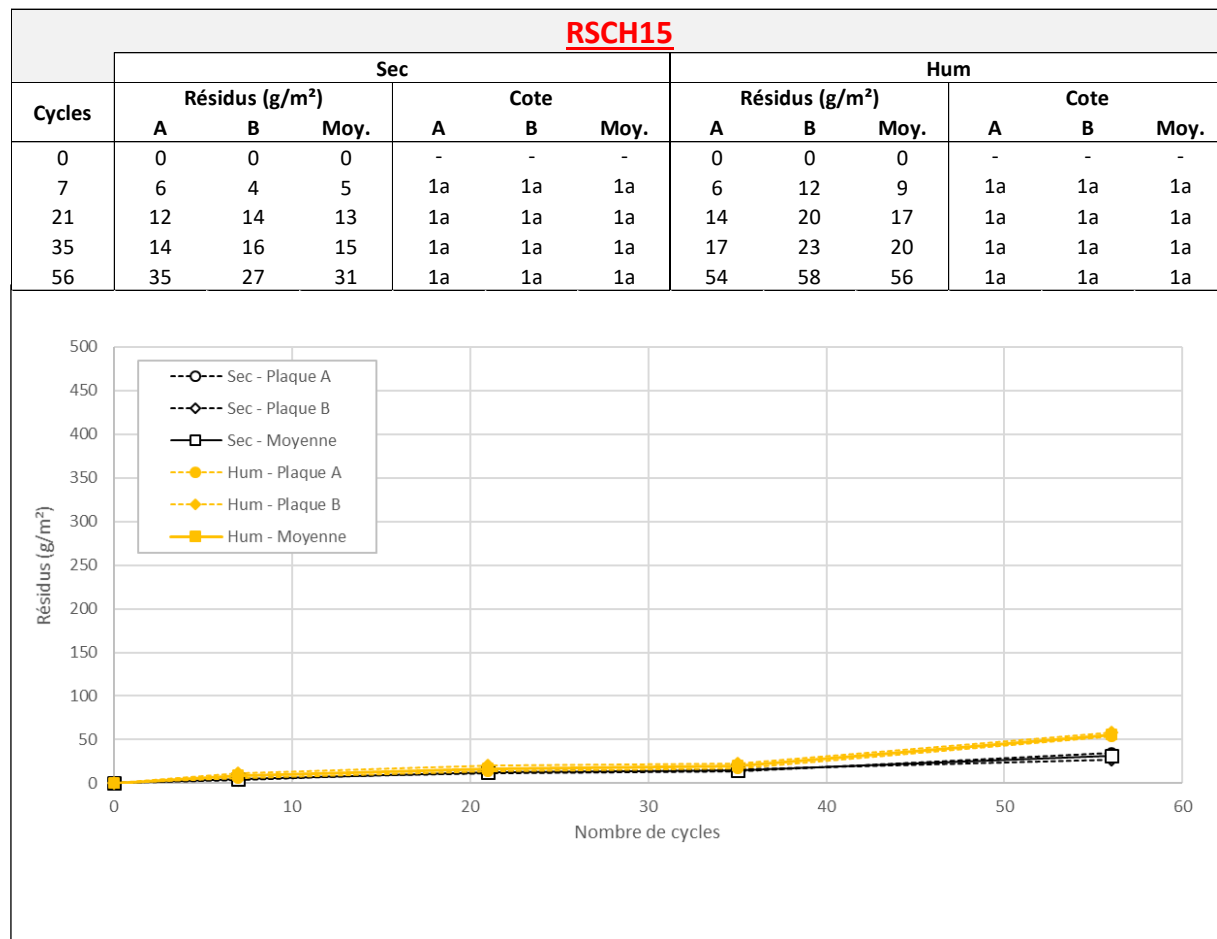
TERCH15-AIR1						
Cycles	Sec					
	Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	0	0	-	-	-
7	4	6	5	1a	1a	1a
21	4	6	5	1a	1a	1a
35	6	10	8	1a	1a	1a
56	10	17	13.5	1a	1a	1a



TERCH15-AIR4						
Cycles	Sec					
	Résidus (g/m ²)			Cote		
	A	B	Moy.	A	B	Moy.
0	0	0	0	-	-	-
7	10	10	10	1a	1a	1a
21	14	12	13	1a	1a	1a
35	30	16	23	1a	1a	1a
56	74	106	90	1a	1a	1a



Liant RapidSet



RSCH15

Sec



Hum

